

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ КАРЕЛИИ

А. И. Родионов, П. А. Рязанцев

*Институт геологии Карельского научного центра
Российской академии наук, г. Петрозаводск*

Поступила в редакцию 13 декабря 2016 г.

Аннотация: в статье описываются базовые принципы георадиолокации, сфера её применения, а также особенности обработки и интерпретации наблюдаемых данных. Приводятся материалы георадиолокационного обследования ледниковых отложений в Юго-Западной части Карелии. Рассматривается практический пример изучения денудационно-аккумулятивной равнины, где при помощи георадара выделены разные литотипы песка, определена текстура их залегания и обнаружены выходы коренных пород.

Ключевые слова: георадиолокация, четвертичная геология, ледниковые отложения, радарограмма, интерпретация, месторождение песка.

GROUND-PENETRATION RADAR STUDY OF GLACIAL SEDIMENTS IN THE SOUTH-WEST KARELIA

Abstract: this article describes the basic principles of ground-penetrating radar (GPR), the scope of its application and features of the processing and interpretation of the observed data. Materials of GPR survey of glacial deposits in the South-West part of Karelia are provided. In this paper observed the practical example of studying of the denudation-accumulative plain where with the help of GPR were allocated different lithotypes of sand, identified theirs bedding structures and bedrock outcrops were discovered.

Key words: ground-penetrating radar, quaternary geology, glacial sediment, interpretation, sand deposits.

Введение

Методы малоглубинной геофизики являются эффективным инструментом изучения верхних слоев земной коры. Георадиолокация появилась в арсенале геологов сравнительно недавно и в данный момент находит все большее применение при выполнении изысканий связанных с исследованием четвертичных отложений, сложенных различными дисперсными грунтами [1]. Цель представленной статьи заключалась в изучении возможностей георадиолокации при оценке строения и структуры ледниковых отложений, распространенных в Юго-Западной части Карелии.

Методы и подходы

Георадиолокация является методом неразрушающего изучения толщи пород на основе излучения электромагнитной волны в диапазоне частот от 30 до 2000 МГц и регистрации её отклика, искажённого геологическими неоднородностями. Принимаемые импульсы формируют так называемое волновое поле, состоящее из трёх основных типов волн: прямой, отраженной и дифрагированной [2, 3]. Прибор для выполнения наблюдений методом георадиолокации – георадар. Как правило, он состоит из трех основных блоков: антенного бока (включающего передающую и приёмную антенны), регистратора (компьютер) и

блока управления. При георадиолокационном исследовании блок георадара перемещается по определённому профилю, при этом происходит излучение и прием наносекундных импульсов через определенное расстояние. Это расстояние называется «шаг зондирования» минимальное значение, которого может достигать нескольких миллиметров. В результате измерений формируется набор электромагнитных трасс (радарограмма), который содержит информацию о строении и наличии неоднородностей диагностируемой геологической среды. Использование в георадарах излучателей с разными частотами сигнала обеспечивает разное соотношение между разрешающей способностью и глубиной проникновения сигнала. Например, для антенны с центральной частотой 150 МГц максимальная глубина исследований составляет 12 м с разрешением 0,3 м, а для частоты 1700 МГц 1 м с разрешением 0,03 м. Следует отметить, что кроме аппаратурных характеристик получаемые результаты сильно зависят от состава и электрофизических свойств горных пород [4].

С точки зрения георадиолокации важными являются следующие параметры среды: диэлектрическая проницаемость, скорость распространения электромагнитной волны, удельное затухание. Основная задача в обработке данных георадиолокации – перейти

от временного разреза к глубинному. Для этого на радарограммах по оси синфазности дифрагирующей волны выделяются гиперболы. Размах “крыльев” гиперболы зависит от скорости прохождения электромагнитной волны и соответственно диэлектрической проницаемости среды. Так же следует учитывать, что при использовании антенных блоков разной частоты на одном профиле, значение относительной диэлектрической проницаемости может меняться (явление частотной дисперсии) [5]. Интерпретация данных георадиолокации осуществляется при помощи специального программного обеспечения (например, GeoScan32), которое автоматически, при подборе нужного размаха крыльев гиперболы, вычисляет значение диэлектрической проницаемости, определяет слои с разными свойствами, выполняет фильтрацию сигнала и т.д.

С помощью георадара решается множество задач малоглубинной геофизики. Метод хорошо зарекомендовал себя при инженерно-геологических изысканиях, гидрогеологических исследованиях, в седиментологии и археологии [1, 2, 4]. Главной проблемой ограничивающей применимость георадиолокации является то, что метод может оказаться не информативным при наличии в толще проводящих слоев, которые выступают своеобразными экранами для электромагнитного сигнала. К таким слоям относятся прослойки глин, минерализованные водонесущие горизонты, зоны повышенной железистой минерализации. Так же, важную роль при работе с георадаром играет опыт геофизика-интерпретатора, так как получаемая волновая картина зачастую осложнена различными помехами и сигналами-повторениями, что существенно влияет на результаты обработки.

При изучении горизонтально слоистых сред георадар позволяет получить полный двумерный разрез и значительно повысить детальность исследований, начиная от 1 метра, вне зависимости от пространственной изменчивости слоёв. При благоприятных

условиях производительность полевой георадарной съёмки на порядок выше, чем у классических электроразведочных методов, применяемых для изучения верхней части разреза. Это обусловлено тем, что нет необходимости в детальной разметке профиля, заземлении электродов, растягивании линий, так как радар просто буксируется по намеченному маршруту, с автоматическим учётом пройденного расстояния (рис.1А). При этом, оценить качество получаемой информации и получить первые результаты можно прямо в полевых условиях (рис. 1Б).

Использование низкочастотных георадарных антенн позволяет выявлять мощность донных отложений морей, озёр и рек, проводить батиметрические изыскания, осуществлять факультальный анализ рыхлых отложений, а так же проводить периодизацию режимов осадконакопления [1, 6, 7]. В ряде статей освещается влияние различных геологических факторов, таких как слоистость, углы падения, размер зерен на поведение сигнала и сопутствующих изменений. К примеру, в работе – Guillemoteau et al., [3], рассматривается влияние размера зерен песка и характеристик упаковки грунта в естественных условиях залегания на особенности распространения электромагнитной волны.

Множество исследований касаются возможностей метода при проведении геофизических и геологических изысканий в пределах регионов, активно подвергшихся влиянию ледников в четвертичный период [7, 8, 9]. Разность в характере поведения сигнала и особенности присущие каждому литотипу, слагающему толщу, позволяет разделять исследуемый массив на фации. Так же следует принимать во внимание, что при использовании георадара следует учитывать ряд факторов, препятствующих корректной работе метода, главным из которых является наличие линз глинистого материала, мешающих проникновению сигнала на глубину.

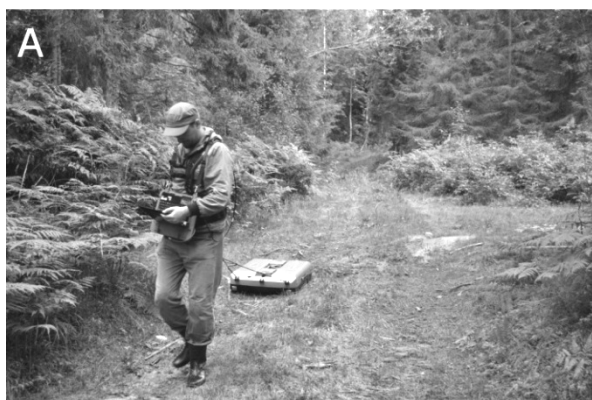


Рис. 1 Фотографии георадарной съёмки в полевых условиях: А – процесс съёмки; Б – анализ радарограммы в полевых условиях.

Геология района работ

Четвертичные отложения ледникового генезиса на территории России широко представлены в Северо-западном регионе, в том числе и в Карелии. Они активно исследовались различными учеными [10, 11, 12

и др.]. Были установлены особенности строения и условия формирования гляциальных отложений, выделены комплексы и т.д. Наряду с уточнением строения толщи и выделением различных ледниковых комплексов, существует ряд научных и прикладных задач

четвертичной геологии, которые могут быть решены при помощи метода георадиолокации. Применения такого метода, в совокупности с традиционными способами геологического изучения (изыскания с использованием бурения, шурфовое опробование), позволяет значительно расширить спектр получаемой информации и существенно дополнить уже имеющиеся знания.

В качестве примера возможностей георадарной съемки приводится исследования участка в пределах

денудационно-аккумулятивной равнины, сложенной ледниковыми осадками разных генетических типов (главным образом ледниковыми и флювиогляциальными), которые образуют различной мощности чехол, часто прерывающийся выходами скальных пород. Рассматриваемая площадь находится в Юго-Западной части Республики Карелия, недалеко от Ладожского озера. На данной территории осуществляется разведка месторождения песка для нужд дорожного строительства (рис. 2).

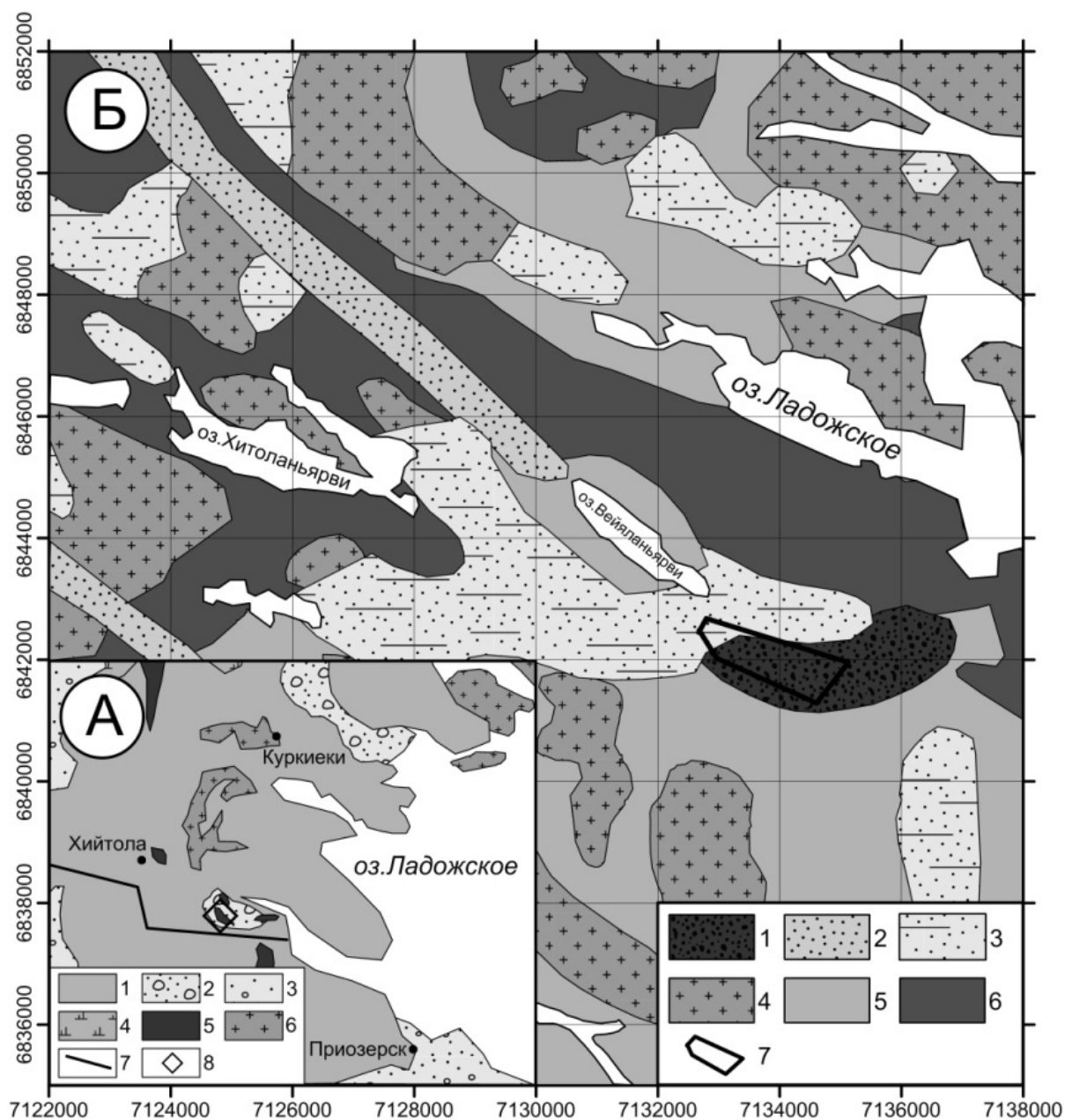


Рис. 2 Геологическая карта участка работ: А. Региональная карта четвертичных отложений района работ [13]: 1 – ритмично-слоистые глинисто-алевролитовые отложения; 2 – песчано-гравийные отложения вне озера; 3 – гравийно-песчаные морены; 4 – торфяники; 5 – озера, флювиогляциальные дельты, зандры, краевые гряды из сортированного материала; 6 – выходы дочетвертичных пород; 7 – граница Ленинградской области и РК; 8 – расположение участка работ. Б. Детальная геологическая карта участка работ [14]: 1 – флювиогляциальные – пески с гравием и галькой (*fllos*); 2 – аллювиальные- пески, супеси, галечники (*all-H*); 3 – ледниковые- валунные пески, супеси, суглинки, глины (*gllos*); 4 – дочетвертичные породы; 5 – озерные-галечники, пески, глины, суглинки, диатомиты, озерные руды, сапропели (*lH*); 6 – озерно-ледниковые глины, суглинки, пески (*lgllbl*); 7 – контур лицензионной площади участка работ.

В геоморфологическом отношении участок недр расположен в пределах денудационно-аккумулятивной равнины, сложенной осадками разных генетических типов, которые образуют различной мощности чехол, часто прерывающийся выходами скальных пород. Мощность рыхлых осадков изменяется от долей метра на вершинах и склонах крупных гряд до 20-30 м в депрессиях и долинах рек и озер. Представлены они верхнечетвертичными ледниковыми и флювиогляциальными отложениями карельского ледникового подгоризонта. Верхнекарельские озерные отложения (И) получили развитие в пределах озерных котловин и приозерных понижений, кое-где участки могут быть холмисто-грядового рельефа. Озерные отложения представлены преимущественно галечниками, песками, глинами, суглинками, диатомитами, озерными рудами и сапропелями, и залегают на кристаллическом фундаменте. Расположены они на абсолютных отметках от 20 до 60 м. Аллювиальные отложения (алл-И) слагают устья и поймы рек и представлены песками, супесями и галечниками. Они залегают на озерных (И) и озерно-ледниковых (lgIIIbl) отложениях и на дочетвертичных породах. Аллювиальные отложения имеют абсолютные отметки высот около 20 м. Озерно-ледниковые (lgIIIbl) отложения распространены в пределах холмистого рельефа с абсолютными отметками от 20 до 80 м. Сложены глинами, суглинками и песками

и залегают на озерных отложениях (И) и на дочетвертичных породах. Флювиогляциальные отложения (fIIIos) верхнекарельского возраста слагают зандровое поле и залегают на абсолютных отметках от 30 до 70 м. Представлены они песками с гравием и галькой, нечеткой горизонтальной слоистостью и сравнительно небольшим количеством гравия и валунов. Флювиогляциальные отложения залегают как на ледниковых отложениях, так и на коренных породах. Мощность их составляет 10-18 м. Ледниковые отложения (gIIIos) верхнекарельского возраста располагаются в пределах равнины, абсолютные отметки которой колеблются от 40 до 55 м. Они представлены валунными песками, супесями, суглинками и глинами и залегают под озерными (И) и озерно-ледниковыми (lgIIIbl) отложениями. Участок недр включает в себя лишь 2 вида отложений, перечисленных выше: ледниковые (gIIIos) и флювиогляциальные (fIIIos). Большую его часть занимают флювиогляциальные отложения (fIIIos) – пески с гравием и галькой. Лишь небольшую часть на севере участка занимают ледниковые отложения (gIIIos), которые представлены валунными песками, супесями, суглинками и глинами [15].

Результаты и обсуждения

Детально исследовано месторождение песка в Лахденпохском районе Республики Карелии (рис. 3). На его

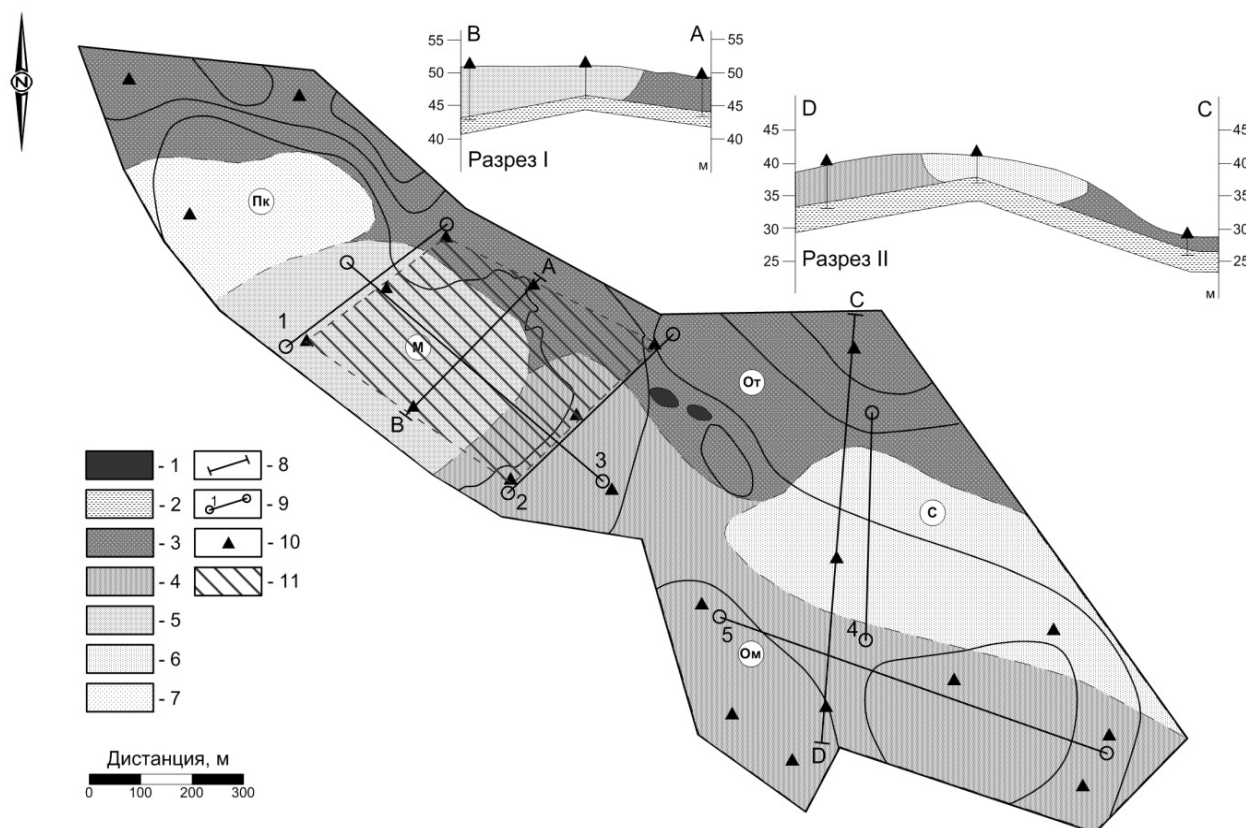


Рис. 3 Геологическая схема исследуемого месторождения (с разделением песка по крупности согласно ГОСТ 8736-93): 1 – дочетвертичные образования; 2 – супесь; 3 – песок очень тонкий; 4 – песок очень мелкий; 5 – песок мелкий; 6 – песок средний; 7 – песок повышенной крупности; 8 – геологические разрезы; 9 – профиль георадиолокации и его номер; 10 – скважины; 11 – блок подсчета запасов по категории С₁.

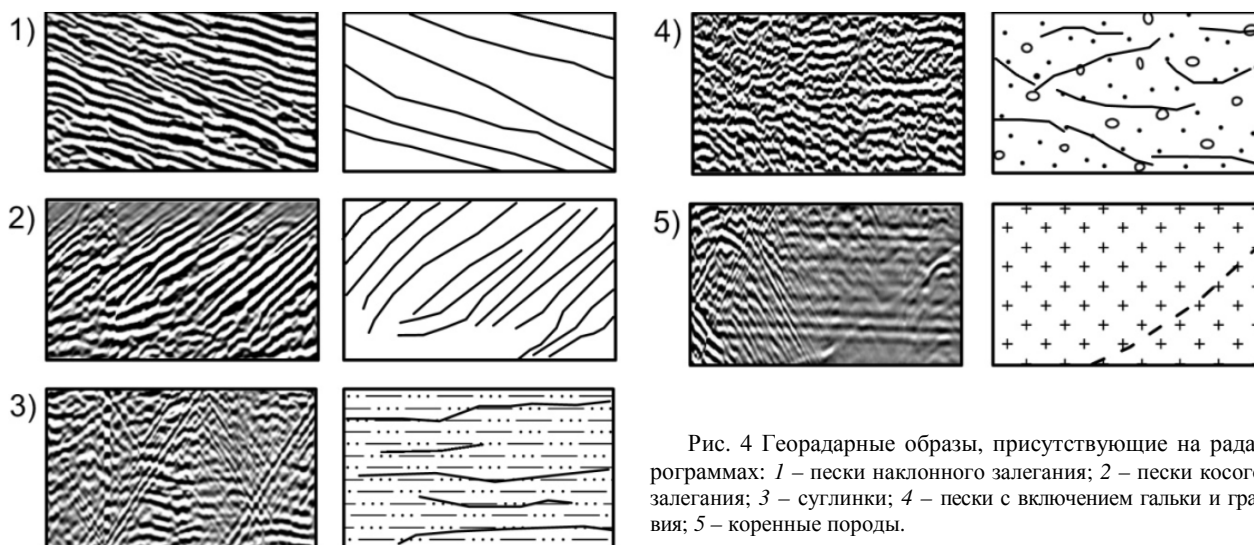


Рис. 4 Георадарные образы, присутствующие на радарограммах: 1 – пески наклонного залегания; 2 – пески косога залегания; 3 – суглинки; 4 – пески с включением гальки и гравия; 5 – коренные породы.

площади было выполнено 5 профилей георадиолокации, два из которых (4, 5) были рекогносцировочными, а три располагались в наиболее перспективной части участка (1-3). Основными задачами георадиолокации являлось выделение областей залегания песка и локализация коренных пород. Сначала выполнялся обобщенный анализ полевых геологических (скважины, шурфы) и геофизических данных, что позволило обосновать критерии для обработки радарограмм. По характеру поведения волнового поля на радарограммах были выделены так называемые георадарные образы (или в зарубежной литературе георадарные фации [1,16]), которые соотносятся с различными литотипами (рис. 4).

Первый образ характеризуется узкими наклонными осями синфазности отражённых волн, с чётко проявленной слоистой структурой (рис. 4.1). Его можно сопоставить с мелкозернистыми песками, имеющими и наклонное залегание (углы наклона 15°), предположительно озерно-ледникового генезиса.

Второй образ имеет интенсивные оси синфазности отражённого сигнала, с относительно длинным периодом и чётко проявленной наклонной слоистостью (рис. 4.2). Он интерпретируется как тонкие пески наклонного залегания (угол наклона 40°), с включениями гравия и гальки, предположительно флювиогляциального генезиса.

Третий образ характеризуется повышенным затуханием электромагнитного сигнала за счет увеличения содержания глинистого вещества и единичными осями синфазности сформированных за счет отдельных прослоев песка (рис. 4.3). Он соотносится с суглинками ледникового генезиса, подстилающимися вышележащие песчаные слои (вскрыты скважинами).

Четвертый образ характеризуется прерывистыми осями синфазности и большим количеством единичных, нечетких дифрагированных волн над локальными объектами, идентифицированными как включения валунов и гравия (рис. 4.4). Эти данные позволяют

соотнести образ №3 с песками, включающими гальку и гравий.

Пятый образ выделяется отсутствием осей синфазности, что позволяет его соотнести с коренными породами, выходы которых на поверхность наблюдаются в пределах участка (рис. 4, 5). Кроме того, георадиолокация показала наличие отдельных крупных трещин в скальном массиве.

Рассмотрим результаты георадиолокации на примере профилей, выполненных в центральной части месторождения (рис.3). Анализ радарограмм, полученных на профилях (рис. 5, 6) показал, что изучаемая толща представлена главным образом песками, при этом она структурно неоднородна. Образы первого типа наблюдаются на пикетах (ПК) 0-25 профиля №1 и 0-50 профиля №2. Тонко пески косога залегания выделены в интервалах ПК 25-150, 250-275, 450-400 на профиле №1 и ПК 0-125, 20-400 на профиле №2. Суглинки на радарограммах локализованы в нижней части разреза ПК 0-55, 75-225, 350-400 профиля №1 и ПК 25-75, 90-170, 250-400 профиля №2. Образы четвертой категории зафиксированы на ПК 125-150, 275-300 профиля №1 и ПК 50-100, 125-220, 240-310 профиля №2. Выходы коренных пород были выделены только на втором профиле в пределах ПК 80-100, 175-190 и 210-250.

Георадиолокация позволила установить, что основная часть участка сложена песками, а не ПГС как предполагалась ранее. Это видно по характерному поведению волнового поля (рис. 5,6), которое позволяет выделить фацию песка косога залегания. Мощность полезной толщи варьируется в среднем от 4 до 10 метров. Ниже она подстилается суглинками и коренными породами, граница с которыми хорошо прослеживается на радарограммах. Так же, стоит отметить, что в результате интерпретации георадиолокационных профилей наблюдалась хорошая сходимость со скважинами шнекового бурения, выполненных на участке. Буровые колонки вынесены на обзорных профилях (рис. 5, 6).

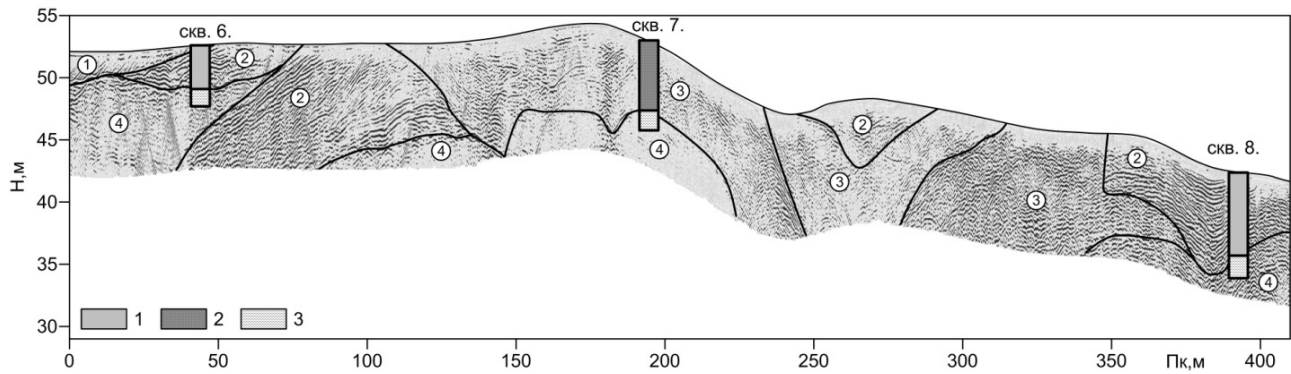


Рис. 5 Георадарный профиль № 1: 1 – пески наклонного залегания; 2 – пески косого залегания; 3 – пески с включением гальки и гравия; 4 – суглинки. Легенда для буровых колонок: 1 – тонкозернистый песок; 2 – мелкозернистый песок с галькой; 3 – суглинок.

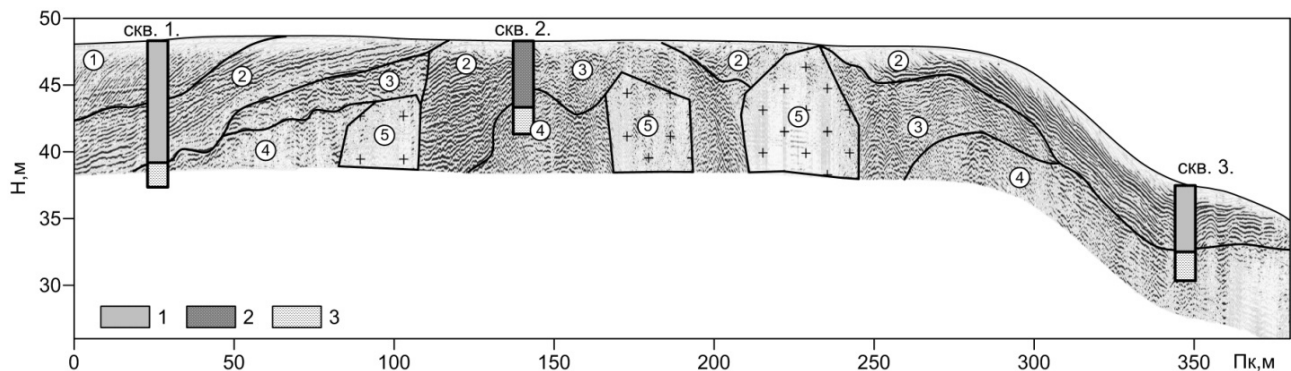


Рис. 6 Георадарный профиль № 2: 1 – пески наклонного залегания; 2 – пески косого залегания; 3 – пески с включением гальки и гравия; 4 – суглинки; 5 – коренные породы. Легенда для буровых колонок: 1 – тонкозернистый песок; 2 – мелкозернистый песок с галькой; 3 – суглинок.

Заключение

В ходе геофизических разведочных работ на месторождении песка с методом георадиолокации был получен широкий спектр данных. Применение георадара позволило выполнить фациальный анализ толщи, на основе которого локализованы наиболее перспективные для разработки части месторождения. В результате интерпретации радарограмм определены элементы залегания песчаной толщи, выделены границы подстилающих суглинков, установлено положение выходов коренных пород к поверхности.

На основе результатов работ показанных в статье сделаны выводы о том, что методика георадиолокации оптимально подходит в качестве ведущего геофизического метода исследования флювиогляциальных отложений, в качестве первой стадии изучения и картирования площади. При этом методика георадарной съёмки может быть оперативно скорректирована в зависимости от геологических особенностей участка работ, а обработка материалов выполнена в полевых условиях в кратчайшие сроки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neal, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress / A. Neal // *Earth-Science Reviews*, 2004. Vol.66. –P. 261–330.
2. Владов М. Л., Введение в георадиолокацию. Учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – Москва:

Издательство МГУ, 2004. 153 с.

3. Guillemoteau, J. Influence of grain size, shape and compaction on georadar waves: example of an Aeolian dune / J. Guillemoteau, M. Bano, J.R. Dujardin // *Geophysical Journal International*, Oxford University Press. 2012. Vol. 190, –P. 1455–1463.
4. Daniels, D. J. *Ground Penetrating Radar*. 2-nd edition / D. J. Daniels. – London : UK. IEE Press, 2004. – 726 p.
5. Аузин, А. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов метода георадиолокации) / А. А. Аузин, С. А. Зацепин // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология*. – 2015. № 4. С. 122–127.
6. Рязанцев, П. А. Опыт комплексирования георадиолокации и динамических зондирований при инженерно-геологических изысканиях на акватории Онежского озера / П. А. Рязанцев, А. И. Родионов // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология*. – 2015. № 2. С. 100–103.
7. Bennett, M. R. Internal structure of a barrier beach as revealed by ground penetrating radar (GPR): Chesil beach, UK / M. R. Bennett, N.J. Cassidy, J. Pile // *Geomorphology*. 2009. Vol. 104. – P. 218–229.
8. Pasanen, A. Radar stratigraphy of the glaciotectonically deformed deposits in the Isoniemi area, Haukipudas, Finland / A. Pasanen // *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2009. Vol. 81. –P. 39–51.
9. Pellicer, X. Electrical resistivity and Ground Penetrating Radar for the characterisation of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland / X. M. Pellicer, P. Gibson // *Journal of Applied Geophysics*, 2011. Vol. 75. – P. 638–647.

10. Бискэ, Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии / Г. С. Бискэ. – Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1959. 307 с.
11. Демидов, И. Н. Стратиграфия и литология средне- и позднеплейстоценовых отложений юго-восточного Прионежья / И. Н. Демидов, Н. Б. Лаврова, Ю. П. Лунка // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерогения Северо-Запада России. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. С. 116–120.
12. Лукашов, А. Д. Условия формирования рельефа и четвертичных отложений Карелии в поздне и послеледниковые как основа становления современной природной среды / А. Д. Лукашов, И. Н. Демидов // Биогеография Карелии. Труды КарНЦ РАН. Сер. Б. Биология. Вып. 2. Петрозаводск. 2001. – С. 3–11.
13. Четвертичные отложения Финляндии и Северо-Запада Российской Федерации и их сырьевые ресурсы // ред. Й. Ниэмеля, И.М. Экман, А.Д. Лукашов. -1:1 000 000. Эспоо : Геологический НИИ Финляндии, 1993.
14. Карта размещения месторождений и проявлений неметаллических полезных ископаемых Республики Карелия. Лист 3. Минерально-строительное сырье // Отв. ред. В. П. Михайлов, А. Г. Леонтьев, Ю. Б. Голованов, В. М. Ярцев. –1:1000000. Петрозаводск. – 2005.
15. Михайлов, В. П. Минерально-сырьевая база Республики Карелия Книга 2: Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи / В. П. Михайлов, А. Г. Леонтьев, Ю. Б. Голованов. – Петрозаводск, 2006. 357 с.
16. Bayer, P. Three-dimensional high resolution fluvio-glacial aquifer analog: Part 1: Field study / P. Bayer, P. Huggenberger, P. Renard, A. Comunian // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 405. – P. 1–9.

Институт Геологии Карельского научного центра Российской Академии Наук (ИГ КарНЦ РАН), г. Петрозаводск

*Родионов Александр Игоревич, аспирант, старший лаборант-исследователь
E-mail: fabian4695@gmail.com; Тел.: +7 9114158362*

*Рязанцев Павел Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник
E-mail: chthonian@yandex.ru
Тел.: +7 9062074456*

Institute of Geology Karelian Research Center Russian Academy of Science

*Rodionov A. I., Post-graduate Student
E-mail: fabian4695@gmail.com
Tel.: +7 9114158362*

*Ryazantsev P. A., PhD, Scientific Researcher
E-mail: chthonian@yandex.ru
Tel.: +7 9062074456*