

ФАНО России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
(КарНЦ РАН)

На правах рукописи

Родионов Александр Игоревич

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)
на тему: **«Георадиолокационное изучение ледниковых отложений юго-
восточной части Фенноскандинавского щита»**,
подготовленной в соответствии с требованиями
Федерального государственного образовательного стандарта
высшего образования по направлению 05.06.01. Науки о Земле
(уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Научный руководитель:
Заведующий лабораторией геофизики
ИГ КарНЦ РАН
д.г.-м.н. Н.В. Шаров

Петрозаводск - 2018

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Территория Фенноскандинавского щита подверглась значительной экзарации ледниковыми массами в ходе последнего оледенения. Данный факт обуславливает наличие большого количества четвертичных отложений различного генезиса на территории северо-запада Российской Федерации и Республики Карелии. В рельефе они могут быть представлены озами, камами и аккумулятивными равнинами.

Исследование ледниковых отложений актуально как с научной, так и с практической точки зрения. Такие структуры зачастую имеют достаточно сложное строение, что осложняет их изучение с помощью классических геологических методов исследования. Изучение гляциальных отложений Фенноскандинавского щита пришлось на вторую половину XX века. Работы проводились сотрудниками сначала сектора, а потом и института геологии Карело-Финского филиала АН СССР и опубликованы в монографиях, а также в отчетах, сформированных в ходе научно-исследовательских работ (НИР). Большая часть информации была получена с помощью точечного шурфового опробования и бурения. Данные методы обладают высокой информативностью, однако, весьма трудозатратны и применение их в рамках масштабных площадных работ малорентабельно. Наряду с этим, использование современных геофизических методов позволяет значительно увеличить количество и качество получаемой информации о подобных геологических объектах с гораздо меньшими трудозатратами при схожей, а зачастую и большей глубине исследований. Одним из таких методов является метод георадиолокации, который позволяет получить широкий спектр информации о строении геологической среды, основываясь на пространственном распределении её диэлектрической проницаемости. Георадиолокации хорошо зарекомендовала себя при решении седиментологических и геоморфологических задач по всему миру, что указывает на целесообразность ее применения и на территории Карелии. Применение метода георадиолокации позволяет быстро и с высокой степенью достоверности строить геологические разрезы, выделять элементы залегания слоев, а также проводить первичный фациальный анализ полигонов исследования и все это на значительных площадях, при минимальных трудозатратах.

Цель и задачи исследования. Целью представленной работы было получение новых и уточнение уже имеющихся данных об особенностях распространения и залегания гляциальных и флювиогляциальных отложений на юго-восточной части Фенноскандинавского щита, с помощью метода георадиолокации.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучить различные по морфологии формы ледникового рельефа и получить георадарные образы характеризующие их;
2. Осуществить георадиолокационное изучение малых водоемов, сформировавшихся на Фенноскандинавском щите в результате деятельности ледников;
3. Апробировать возможности метода георадиолокации при выделении и анализе сейсмодислокационных нарушений в донных осадках малых водоемов;
4. Оценить возможность метода георадиолокации в рамках решения прикладных геологических задач, в процессе поиска и разведки месторождений песка и ПГС.

Научная и практическая значимость. Получены георадарные образы, характеризующие особенности распространения песка и ПГС в естественном залегании, основываясь лишь на волновом поле георадиолокации.

Геофизически изучены различные формы ледникового рельефа, выделены отличительные особенности волнового поля.

С помощью георадиолокации были обнаружены несколько сейсмодислокационных нарушений в донных осадках малого озера в Мурманской области.

Выполнен лабораторный эксперимент, в ходе которого была выявлена и оценена степень влияния показателя влажности, а также проводимости толщи на волновое поле георадиолокации в ходе определения ее гранулометрических показателей.

Личный вклад автора. Автором осуществлен сбор и дальнейшая интерпретация данных полевых георадиолокационных изысканий.

Автором была построена физическая модель и выполнен натурный эксперимент.

Сведения об организации, на базе которой выполнялась научная работа, и научном руководителе. Научно-квалификационная работа (диссертация) выполнена на базе лаборатории геофизики Института геологии – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН). Научный руководитель научно-квалификационной работы (диссертации), заведующий лабораторией геофизики ИГ КарНЦ РАН, доктор геолого-минералогических наук Шаров Николай Владимирович.

1. СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЗОРЕ ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы по теме исследования проанализированы и обобщены сведения об общих тенденциях развития метода георадиолокации, а также примеры его использования для изучения четвертичных отложений. Методика георадиолокационного зондирования подповерхностных сред была разработана и активно используется со второй половины XX века (Петровский, 1971; Финкельштейн, 1977, Wait, Schmidt, 1961; 1986; Annan, Davis, 1976; Imai et al., 1987; Milligan, Atkin, 1993; Conyers, Cameron, 1998; Neal, 2004; Jol, 2009). Множество работ посвящено седиментологическим, геоморфологическим исследованиям, а также изучению флювиогляциальных и четвертичных отложений (Финкельштейн и др., 1986; Глазунов, Ефимова, 2001; Владов, Старовойтов 2004; Изюмов, 2008; Arcone et al., 1998; Daniels, 2004; Neal, 2004; Jol, 2009; Pasanen, 2009; Bava, Sambuelli, 2012; Gomez, J Miller, 2017).

Обзор включает более 150 отечественных и зарубежных источников литературы.

2. ФАКТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При подготовке данной работы использовались полевые материалы, полученные на территории Республики Карелия (РК) и Мурманской области на различных объектах в разные климатические сезоны: Озовые гряды Заонежского

полуострова (РК август 2016,2017,2018); Озовые гряды Онего-Сегозерского водораздела (РК, октябрь 2015); Денудационная равнина (РК 2015, 2018 январь); Озера гляциального и флювиогляциального генезиса (РК, Мурманская область зима-лето 2015,2016,2017,2018). Помимо этого использованы материалы натурных экспериментов, выполненных в 2017-2018 гг. На рисунке 1 приведена карта расположения объектов изученных на территории республики Карелия.

Полевая георадиолокационная съемка выполнена при помощи георадара ОКО 2 с низкочастотным антенным блоком АБ 150 (центральная частота излучающего спектра 150 МГц). Данные обрабатывались в программном обеспечении Geoscan32. Графические материалы обрабатывались в пакете программ Surfer.

Для георадиолокационной съемки в ходе эксперимента применен георадар ОКО 2 с высокочастотным антенным блоком АБ 1700 (центральная частота излучающего спектра 1700 МГц).

Выделение георадарных образов осуществлялось по методике амплитудно-частотного анализа получаемого волнового поля и дальнейшего выделения участков соответствующих определенной геологической обстановке (Владов, Старовойтов, 2004; Daniels, 2004; Neal 2004).

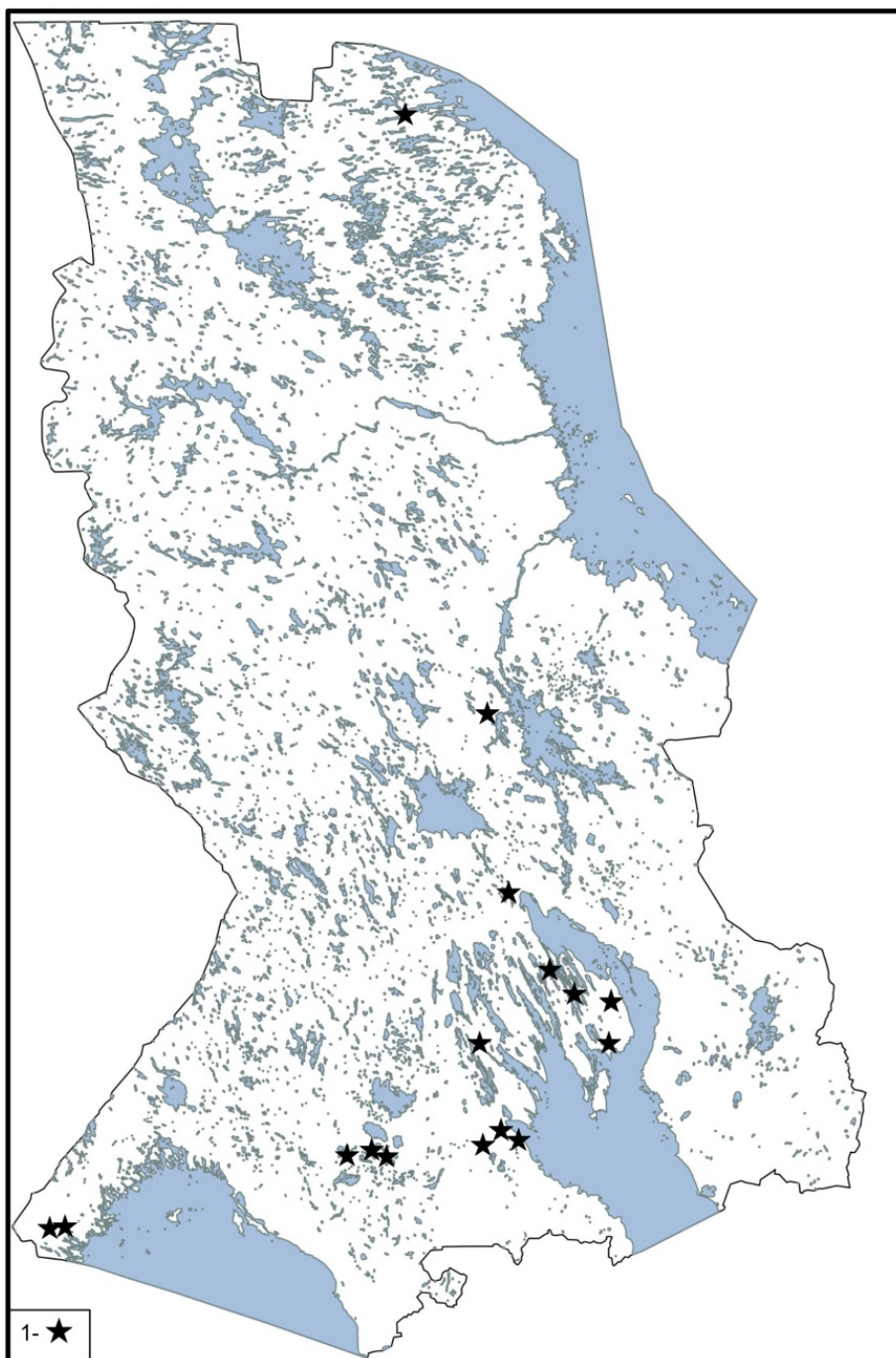


Рис. 1 Расположение Республики Карелия, где 1 - объекты исследования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Ледниковые отложения. Четвертичные отложения различного генезиса, локализованные на Фенноскандинавском щите весьма подробно изучены традиционными геологическими методами изучения (Биске и др., 1959, 1966; Лукашов, Демидов, 2001; Евзеров, 2015). Данный факт позволяет продуктивно

использовать априорную геологическую информацию при интерпретации данных георадиолокационного профилирования.

3.1.1. Денудационно-аккумулятивная равнина. 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).

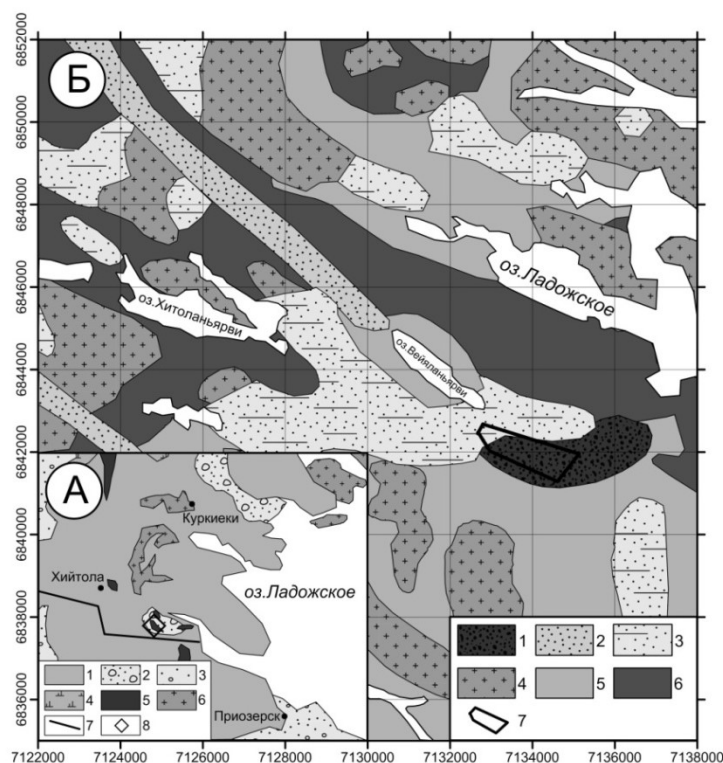


Рис. 2 Геологическая карта участка работ:

А. Карта региональная карта четвертичных отложений района работ
(Четвертичные отложения..., 1993).

На площади участка было выполнено 5 профилей георадиолокации, два из которых были рекогносцировочными, а три располагались в наиболее перспективной, по данным бурения, части участка. Основными задачами георадиолокации являлось выделение областей залегания песка и локализация коренных пород.

В ходе изучения объекта на радарограммах были выделены несколько поисковых радарных образов (радарных фаций), соотносящиеся с литотипами распространенными в пределах изученной площади (рис. 3).

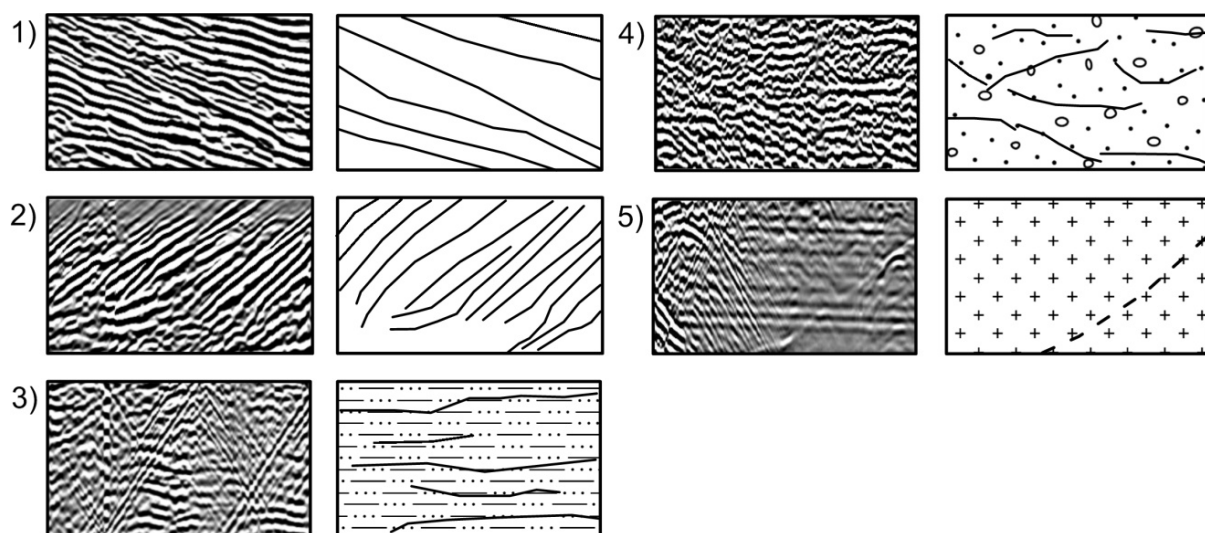


Рис. 3 Георадарные образы, присутствующие на радарограммах:

- 1 – Пески наклонного залегания; 2 – Пески косого залегания; 3 – Суглинки;
4 – Пески с включением гальки и гравия; 5 – Коренные породы.

Первый образ характеризуется узкими наклонными осями синфазности отражённых волн, с чётко проявленной слоистой структурой (рис.3.1). 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.3.2). 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 прослоек песка (рис.3.3). Эти особенности связаны с присутствием суглинков в толще, подстилающей выпележащие 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.3.4). Эти данные позволяют соотнести образ №4 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.3.5). Кроме того, георадиолокация показала наличие отдельных крупных трещин в скальном массиве.

3.1.2 Озовые гряды. Озовые гряды представляют собой формы рельефа, имеющие крутопадающую структуру с одной стороны и более пологую с другой, что связано с особенностями осадконакопления и движения воднопесчаных масс при таянии тела ледника (Бискэ, 1959; Лукашов, Демидов, 2001). Над окружающим рельефом они могут выделяться на несколько десятков метров. Озовые гряды являются удобными для отработки месторождениями песка и ПГС (Бискэ, 1959). Внутренние особенности строения и большое количество обломочного материала в озовых грядах делает такие объекты сложными для исследования с помощью традиционных геологических методов изучения четвертичных отложений (шурфовое опробование толщи, шнековое бурение). Этот факт являлся обоснованием для выбора георадиолокации, как метода позволяющего получать данные с глубины 10 и более метров, с гораздо большей скоростью, при меньших трудозатратах.

Объектом исследований является озовая гряда, расположенная к югу от деревни Кажма. Гряда детально описана в работе (Бискэ и др., 1966), где носит название Кажминский оз. По описанию он характеризуется частой сменой литологического состава. Для верхней части оза характерно присутствие большого количества валунов. В средней части встречается множество линзообразных включений песков различной зернистости и супесей с прослойками глин. В нижней части наблюдаются мелкозернистые кварцевые пески, с небольшим количеством некрупных валунов.

На рисунке 4 изображена радарограмма полученная при обработке одного из профилей пересекающего Кажминский оз. Для толщи была установлена диэлектрическая проницаемость, составившая 5 единиц СИ, что соответствует показателям сухого песка (Владов, Старовойтов, 2004). Линиями на рисунке обозначены условные границы георадарных образов, соответствующие разным по литологическому составу частям толщи. Область №1 (рис. 4) локализована в пределах 0-150 пикета. Она характеризуется четкими, протяженными осями

синфазности и была отнесена к среднезернистому песку с включениями валунов. Так же в интервале 20-40 пикета наблюдаются неоднородности сигнала, соотносимые с линзами песка и ПГС, отличающегося по крупности от остальной толщи.

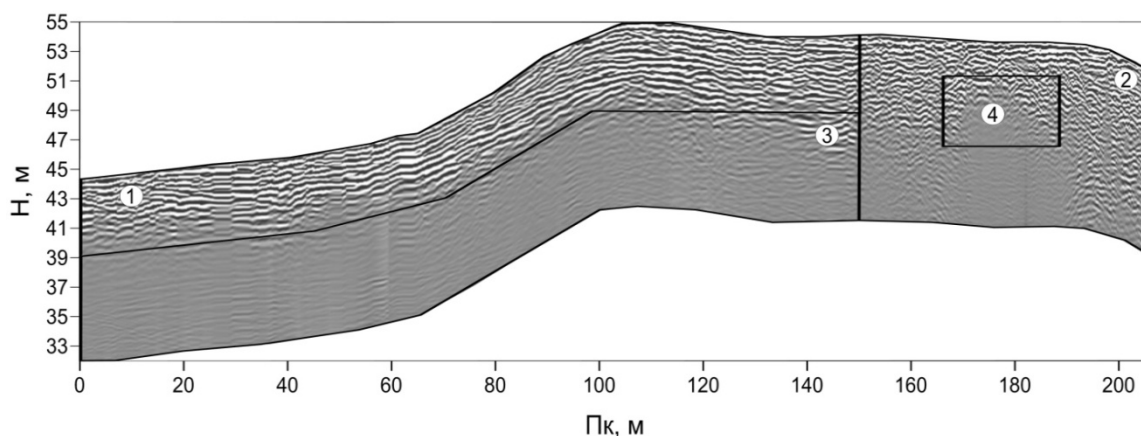


Рис. 4. Радарограмма полученная при исследовании Кажминского оза.

Цифрами обозначены области, характеризующие различные георадарные образы.

Область №2 (рис.2) характеризуется хорошо различимыми нарушениями осей синфазности и появлением гиперболических волн, свидетельствующих о наличии локальных объектов в толще. Характер волнового поля смещается в сторону хаотичного. Эти факты указывают на появление включений валунов большего размера, в сравнении с областью №1.

Область №3 и область №4 характеризуются повышенным затуханием электромагнитной волны, что указывает на появление глинистого слоя в их кровельной части. Как следствие, дешифровка нижележащей толщи не представляется возможной. Этот факт обусловлен слоем ленточных глин, встречающихся на всей площади оза (Бискэ и др., 1966).

В результате выполненных исследований была доказана эффективность метода георадиолокации при изучении озовых гряд. Установлено, что на данные получаемые с использованием георадара обладают высокой информативностью и глубиной исследования, в сравнении с традиционными методами геологического опробования толщи. Наблюдается уверенная корреляция полученных данных с результатами исследований ученых геологов.

3.2 Георадиолокационное изучение малых водоемов Фенноскандинавского щита

3.2.1 Сейсмодислокации в донных осадках водоемов. Перспективным направлением использования георадиолокации является поиск различных нарушений и деформаций (в том числе и сейсмодислокаций), так как зачастую, локализовать такие объекты при помощи геологических выработок крайне трудоемко. Георадиолокация обеспечивает непрерывное сканирование изучаемой толщи, что обеспечивает не только определение местоположения нарушения и, но и определение в первом приближении его параметров (Dentith et al., 2010). В мировой практике георадарное зондирование стало фактически стандартным методом и при проведении различных видов геологических исследований, в том числе и при изучении стратиграфии рыхлых осадочных отложений, а также в палеосейсмологии (McCalpin, 2009; Tamura et al., 2008; Reicheret, Reiss, 2001; Lunina, Gladkov, 2015).

Следует отметить, что использование георадара в палеосейсмологии является все еще новым и не до конца разработанным методом. Однако, в комплексе с другими геолого-геоморфологическими методами и подходами, георадар значительно расширяет возможности таких исследований (Meyers et al., 1996; Sambuelli, Bava, 2012).

Фенноскандинавский щит относится к территориям со слабым уровнем современной сейсмической активности (Маловичко и др., 2007). При этом изучение палеосейсмодислокаций в его пределах имеет важное научное значение при решении фундаментальных задач геодинамики и неотектоники, что отражено в публикациях (Шитов и др., 2010; Lagerback, 1990; Lukashov, 1995; Morner, 2004; Lukashov, Rukosuev, 1997; Nikolaeva et al., 2017).

Интерес к изучению возможности выделения сейсмодислокаций и других катастрофических явлений в донных осадках (ДО) озер обусловлен необходимостью обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования Мурманской области – региона с широко развитым горнопромышленным кластером и объектами атомной энергетики (Кольская АЭС). В то же время локализация и возрастные привязки сейсмодислокаций являются

благоприятными объектами для оценки геодинамического режима территорий, а также индикаторами для выявления зон активных разломов.

Традиционным методом геофизического изучения водоемов является сейсмоакустическое профилирование. В литературе есть множество примеров, где на основе данных, полученных с помощью сейсмоакустики строились весьма подробные разрезы донных отложений (Шалаева, Старовойтов, 2010), а также выделялись следы тектонических нарушений в минерагенных осадках донных отложений озер (Smith et al., 2017). Однако необходимо учитывать меньшую вертикальную разрешающую способность и большую чувствительность к наличию водорослей сейсмоакустического профилирования в сравнении с методом георадиолокации (Kovacs, 1991). Этот факт может являться важным при выборе средств для изучения малоглубинных водоемов и комплексов маломощных донных осадков.

Специфической чертой работы методом георадиолокации на акваториях является наличие водной толщи. Электропроводимость воды сказывается как на глубинности исследований, так и на количестве регистрируемых шумов (Владов, Пятилова, 2009), меняется также и спектральные характеристики сигнала (Омельяненко, Христофоров, 2012). Важно отметить, что, как показывают практические наблюдения, озера расположенные в пределах Фенноскандии имеют оптимальные условия для применения георадара (Старовойтов и др., 2016). Это связано с малой минерализацией воды и, как следствие, с малым затуханием электромагнитной волны, что позволяет получать полезный сигнал на поздних временах с малым уровнем помех.

Объектом исследования являлось озеро «Уполокшское» с высотной отметкой 133.4 м над уровнем моря (над ур. м.), расположенное на западном побережье субширотной (Бабинской) ветви самого крупного водоема Кольского региона – озера Имандра. Котловина озера имеет вытянутую на 1.2 км форму при ширине 0.3-0.5 км и расположена в зоне новейшего линеамента северо-западного простирания, общей протяженностью около 20 км. Берега озера песчано-каменистые, частично заболоченные. По обе стороны от котловины проходят протяженные озовые гряды.

Эта территория входит в состав Беломорского геоблока (террейна), сложенного в основном метаморфизованными докембрийскими породами кристаллического фундамента. В районе расположения озера под чехлом четвертичных отложений, представленных различными моренами, флювиогляциальными и лимногляциальными осадками залегают преимущественно гнейсы комплекса основания (биотитовые, амфибол- и пироксен-биотитовые), мигматиты, амфиболиты и основные вулканиты (Геологическая карта..., 2001).

Важно отметить, что изученная озерная котловина расположена в 45-50 км к западу от внешней полосы самого молодого пояса краевых маргинальных образований Кольского региона (Евзеров, Николаева, 2000). Рельеф района, примыкающего к западному побережью Имандры, представлен в основном болотистыми пространствами и многочисленными озерами, часто с вытянутой формой котловин, обусловленной направлением движения ледников последнего оледенения вдоль господствующих тектонических разломов.

Донные осадки озера Уполокшское были детально изучены ранее при помощи традиционных геологических подходов, включающих бурение скважин, литологический и микропалеонтологический анализы осадков (Николаева и др., 2016; Nikolaeva et al., 2017). Литологическое изучение кернов 5-ти скважин показало, что котловина озера заполнена разнозернистым песком, подстилающим слой алевролита, сменяющегося вверх по разрезу пресноводной гиттией (сапропелем). В толще гиттии резко выделяется аномальный горизонт, состоящий из обломков пород разной формы, цвета и размеров, органического материала, торфа, песка, обломков древесины и других растительных остатков, заключенных в сапропелевую матрицу. Присутствие в разрезах озер аномального («брекчиевого» или «маркирующего») горизонта явно указывает на катастрофические изменения условий осадконакопления. Судя по характеру нарушений, образование осадков было быстрым, одномоментным, что возможно только в результате сильного встряхивания во время землетрясения и связывается с сейсмогравитационными оползневыми процессами. По данным бурения размер оползневого тела 600х50м. Радиоуглеродное датирование образца гиттии из горизонта ненарушенных осадков, подстилающих «брекчиевый» горизонт и обломок древесины из его верхней части свидетельствует об образовании этих осадков в интервале времени 6.5-5.6 тыс.л.н.

(радиоуглеродных) или 6.4-7.3 тыс.л.н. (кал.) (Николаева и др., 2016; Nikolaeva et al., 2017).

Для исследования ДО водоема было выполнено 11 георадарных профилей по льду, общей длиной порядка 4 погонных км, при площади озера 0.33 км². Профили были заложены по нерегулярной сети и сконцентрированы в области расположения геологических скважин (Николаева и др., 2016). Помимо георадиолокации, при помощи кондуктометра СОМ-100, была определена электропроводность воды, составившая 18 мкСм/см при общей минерализации в 7.9 ppm. Подобные низкие значения свидетельствуют о пригодности выбранного озера для изучения методом георадиолокации.

В качестве примера регистрируемых данных, на рисунке 5 приводится схема интерпретации радарограммы по профилю №6 (для удобства восприятия соотношение вертикального масштаба к горизонтальному выбрано 1:10). На первом этапе изучается временной разрез, так как при работе со льда зачастую возникает ряд интенсивных помех, для улучшения данных выполнялась частотная фильтрация записи. Анализ радарограммы позволил выделить оси синфазности и времена прихода сигнала для четырех основных отражающих границ (ОГ) которые можно соотнести с границами: лед–вода, вода–гиттия, гиттия–минеральное основание, а также характерный горизонт в толще гиттии, который рассматривается как маркирующий. Этот горизонт, как уже отмечалось, сложен смесью разных пород, что создает разность электрофизических свойств, вызывающих формирование интенсивного рефлектора.

В интервале между ОГ определены георадарные комплексы, отражающие вещественный состав слоев. Например, в воде отсутствуют оси синфазности внутри слоя, а гиттия характеризуется наличием субпаралельных протяженных осей. Минеральное основание имеет более сложную георадарную картину – бугристую неоднородную структуру записи, с фрагментами протяженных осей синфазности, участками дифрагированных волн и областями затухания. Это позволяет предположить наличие песков разной крупности и формы залегания. Кроме того, на записях фиксировались области срыва протяженных осей синфазности как возможные признаки дислокаций, а также наиболее проявленные волны-помехи.

На втором этапе выполняется переход к глубинному разрезу путем пикирования выделенных слоев и присвоения им параметра ϵ (рис. 2Б), что позволило определить скорость электромагнитной волны и рассчитать глубину залегания каждого слоя. В данном случае для льда и воды использовались справочные значения ϵ , а для гиттии и подстилающего ее песка величина ϵ определялась по набору дифрагированных волн. Льду было присвоено значение $\epsilon = 4$ ед. СИ и $\epsilon = 81$ ед. СИ для воды. Величина ϵ для гиттии составила 64 ед. СИ, а для минерального основания $\epsilon = 20$ ед. СИ.

В итоге, трассировано положение границ каждого слоя и составлен геологический разрез (рис. 5В). По полученным данным установлена мощность гиттии и оценено изменение конфигурации маркирующего горизонта, локализована область тектонических нарушений в минеральных осадках с амплитудой 1.2-1.7м.

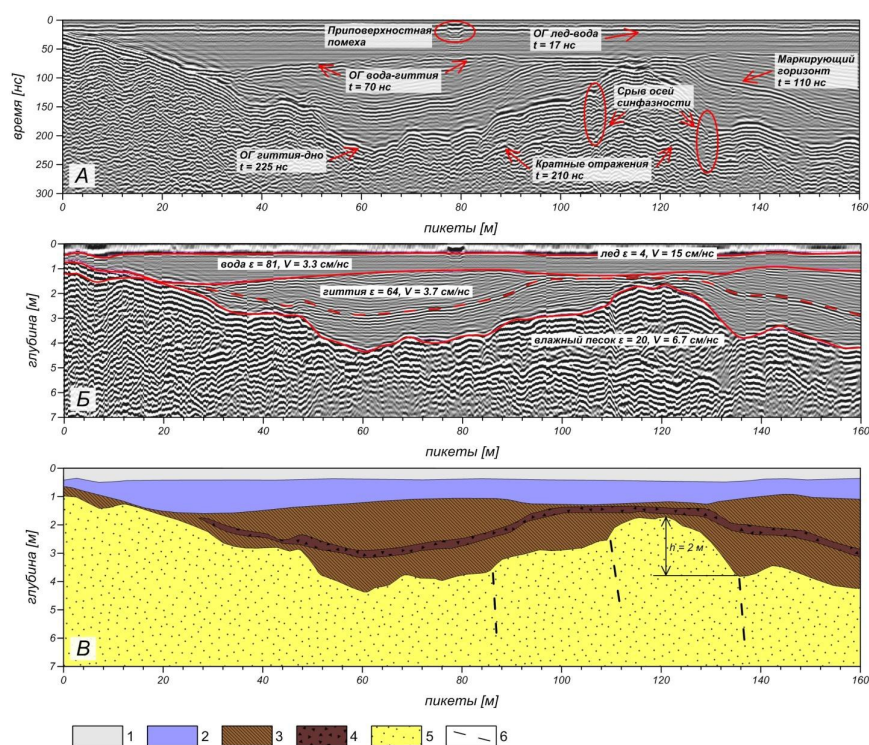


Рис. 5. Профиль георадиолокации 6 с временной разверткой 300 нс (А), пересчитанный в глубинный после ввода ϵ (Б) и результаты интерпретации (В), где: 1 – лед, 2 – вода, 3 – гиттия, 4 – маркирующий горизонт, 5 – пески, 6 – зоны смещения.

Профили георадиолокации привязывались по координатам к скважинам, что позволило сравнить фрагменты радарограмм и литостратиграфические колонки (рис. 6).

Как показало сопоставление стратиграфических колонок и радарограмм, георадиолокация обеспечивает достаточно точное выделение структурных единиц разреза. Для скважин 1-3 погрешность определения границ составила не более 0.2 м, что с учетом заявленной разрешающей способности используемого антенного блока $150\text{М} \pm 0.3\text{ м}$ является приемлемой величиной. В свою очередь для скважин 4-5 наблюдается большее расхождение при локализации границы вода-гиттия, которое достигает 0.3–0.4 м. Такое несовпадение может быть обусловлено переходным типом контакта, когда взвесеподобная гиттия постепенно уплотняется и консолидируется. В результате на радарограмме формируется набор рефлекторов вместо конкретной границы раздела. Что касается алеврита, показанного в колонках, его мощность не превышает 0,1 м поэтому выделить его как отдельный слой не представляется возможным.

Дополнительным фактом, подтверждающим информативность метода георадиолокации, является обнаружение аномальных областей. Скважина 2 вскрывает толщу песка, с включенными в нее фрагментами гиттии, отражающуюся на радарограмме локальной областью, ограниченной интенсивными осями синфазности. В скважине 4 установлено раздвоение маркирующего горизонта, так как мощность гиттии, разделяющей его части, составляет 0.1 м, эта область на георадарной записи отражается как высокоинтенсивная пачка осей синфазности.

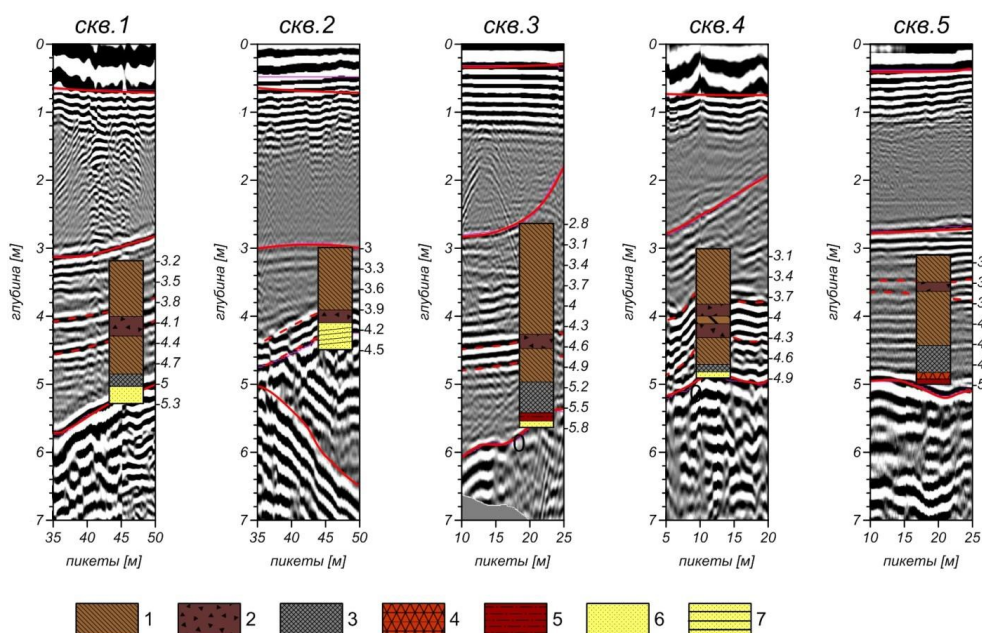


Рис. 6. Сопоставление фрагментов радарограмм и литостратиграфических колонок
кернов донных отложений по (Николаева и др., 2016).

1 – гиттия коричневого цвета; 2 – брекчиевый (маркерный) горизонт; 3 – гиттия
черного цвета; 4 – гиттия с алевритом; 5 – алеврит; 6 – песок; 7 – песок с
прослоями гиттии и алеврита.

На рисунке 7 демонстрируются георадарные образы, на которых зафиксированы сейсмодислокации. На профиле 1 показано вертикальное смещение толщи песков в придонной части озера типа сброса на величину $H = 1.2\text{ м}$, что отражено в морфологии его границы, изменении характера волнового поля, амплитудном опускании маркирующего горизонта. Второй пример, профиль 6 в свою очередь демонстрирует взбросовое смещение, в результате чего произошло образование микроразломов по краям поднятого участка и перемещения маркирующего горизонта вверх.

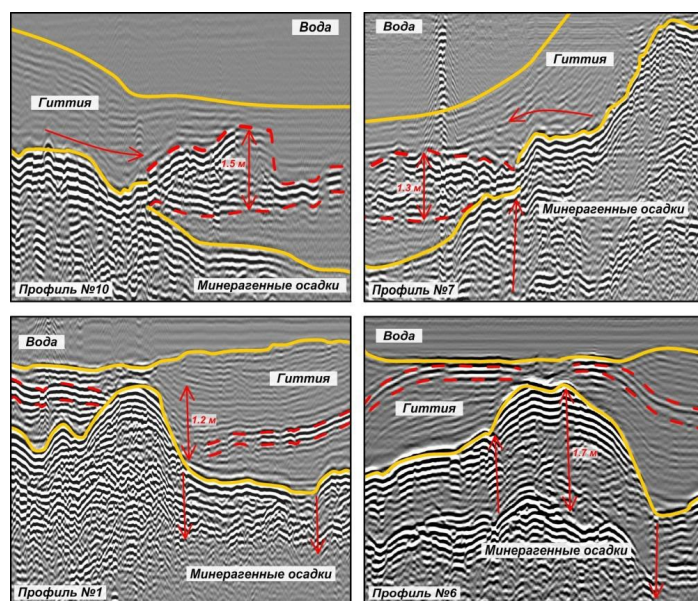


Рис. 7. Георадарные образы, отражающие различные нарушения и деформации в
донных осадках озера по разным профилям.

Так как для выделения различного рода нарушений важно знать не только глубинные отметки, но и представлять морфологию поверхности, градиент изменения глубин и т.д., была построена модель изоповерхности минерального основания озера (рис. 8).

На этой модели можно видеть, что восточная часть озера характеризуется большей глубиной и неоднородностью. Кроме того, в ее центре наблюдается ряд отдельных ступенчатых блоков субширотного (в южной половине озера) и северо-восточного (в северной половине озера) простирания, которые могли сформироваться в результате возможно нескольких (во всяком случае, не менее двух) тектонических (сейсмотектонических) подвижек. Подтверждением этому являются и выявленные независимой группой исследователей многочисленные сейсмонарушения скального субстрата и рыхлых отложений в ближайших окрестностях - на побережьях Имандры и в Хибинах (Зыков, 2001; Шварев, 2003; Максимов, Толстобров, 2015; Nikolaeva et. al.; 2016;).

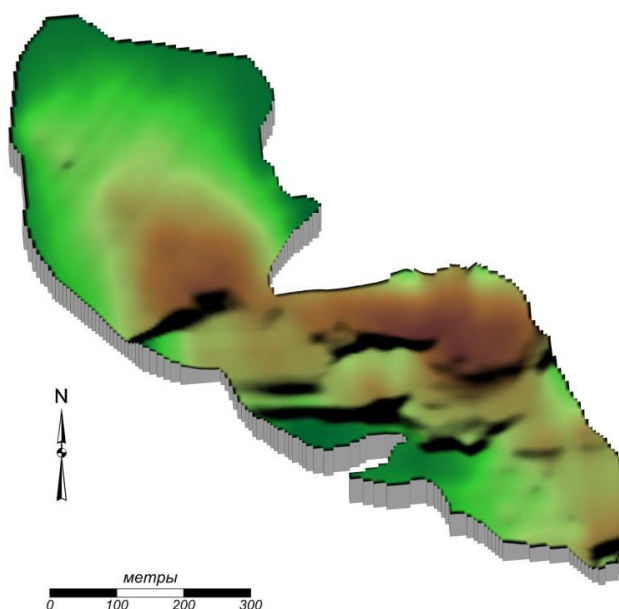


Рис. 8. Модель изоповерхности минерального основания озера.

3.2.2 Изучение особенностей малых водоемов на основе анализа особенностей отраженного электромагнитного сигнала. На территории Республики Карелия находится более 63000 (Филатов и др., 2001) озер площадью более 0,1 Га. Изучение водоемов и донных отложений в большинстве случаев осуществляется методами бурения, характеризующимися высокой трудоемкостью и точечным характером отбора проб. Это факт вызывает необходимость внедрения новых высокоинформативных методов исследования, в том числе геофизических.

В рамках представленной работы методом георадиолокации было изучено несколько малых озер на территории Республики Карелия. Изученные озера имеют ледниковый генезис, каждое из них претерпевает процесс заболачивания береговых линий — происходит постепенное зарастание озерной котловины.

Исследования производились в летний период с борта лодки и в зимний со льда. Примеры полученных данных приводятся на рисунке 9, где изображены радарограммы с озер Ганьковское и Рахойлампи.

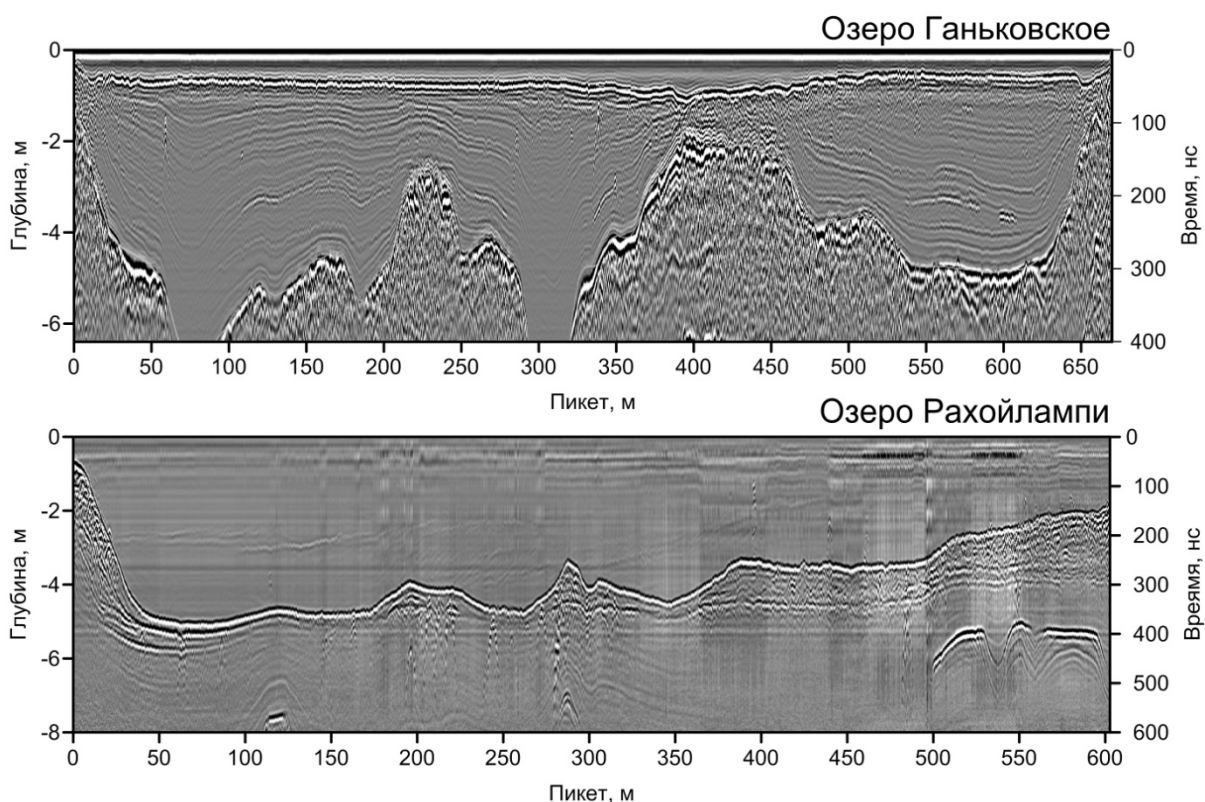


Рис 9. Радарограммы полученные на малых озерах Карелии

В ходе послойной интерпретации радарограммы озера Ганьковское для водной толщи присваивалось $\epsilon = 81$, для толщи органогенных донных осадков (сапропель) 63, для подстилающего минерального основания $\epsilon = 20$. Анализ радарограмм указывает на то, что кровля донных осадков локализуется на глубинах от 25 до 75 см. В толще сапропеля присутствуют протяженные оси синфазности, соотносимые с границами на которых происходит локальное изменение проводимости или возможное уплотнение толщи. Слои отложений сапропеля повторяют морфологию кровли минерального основания, граница

между органогенными и минеральными породами четкая, уверено фиксируемая на радарограмме. Для воды озера Рахойлампи было присвоено значение $\varepsilon = 81$, а для донных осадков 65. Результаты георадиолокации показали, что глубина залегания кровли сапропеля меняется от 1 метра в прибрежной части, до 4 м в центральной части озера. В водной толще фиксируется значительное количество шумов. Граница раздела вода — донные осадки маркируется четко, однако, в самой толще сапропеля происходит затухание отраженного электромагнитного сигнала, что приводит к меньшей эффективной глубинности метода в сравнении с озером Ганьковским. В интервале пикетов 500–600 на временах 400 нс, присутствуют кратные отражения. Следует отметить, что данный вид помех является типичным для георадиолокационных изысканий на водных объектах. Наличие кратных отражений может свидетельствовать о наличии мощной переотражающей границы (Старовойтов, 2008). На озере Рахойлампи этой границей является кровля сапропелевой толщи. В свою очередь выделить кровлю минерального основания не удалось. Помимо георадиолокации на озерах выполнялись замеры электропроводности и общей минерализации воды с помощью портативного кондуктометра СОМ 100, результаты замеров представлены в таблице 1. Несмотря на то, что все озера одного генезиса и существуют практически в одинаковых условиях, их электрофизические параметры отличны друг от друга.

Таблица 1. Некоторые физические свойства воды изученных озер.

№	Название озера	σ_w , мкСм\см	ε донных осадков	Общая минерализация, ppm
1	Озеро Ганьковское	32	63	21
2	Озеро Грязное	26	64	14
3	Озеро Рахойлампи	231	65	162
4	Озеро Падмозеро	177	64	118
5	Озеро Савозеро	191	64	125
6	Озеро Карасозеро	142	65	94
7	Озеро Ламба	91	65	68
8	Озеро Четырехверстное	76	64	49
9	Озеро Глухое	35	63	23

Данные кондуктометрии показали, что величина σ_w озера Ганьковское отличается в 7 раз от того же параметра озера Рахойлампи. Разница σ_w объясняет наличие на радарограмме низкочастотных шумов в водной толще. Комплексный анализ позволил получить зависимость между σ воды и частоты отраженного сигнала (f) в воде. Результаты анализа отображены на графике (рис. 10).

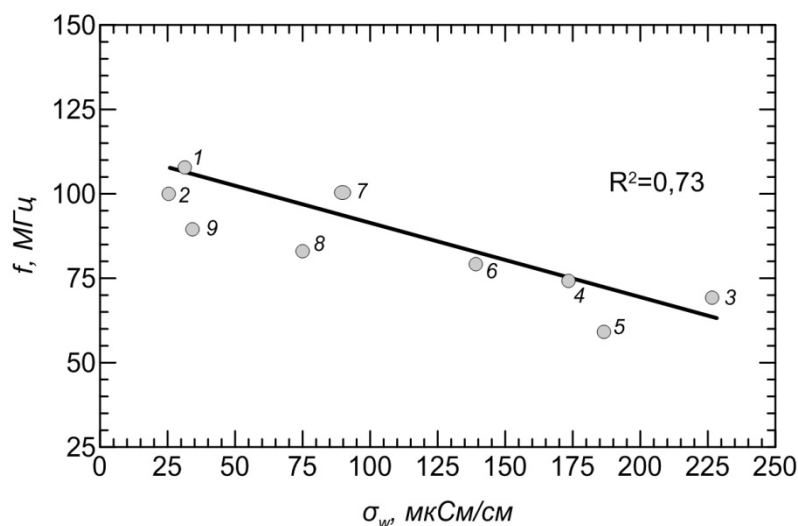


Рис. 10 График зависимости f от σ_w в изученных водоемах.

На графике видна обратная зависимость между f и σ_w . На данном этапе исследования зависимость определяется как линейная. Увеличение статистической выработки позволит установить характер зависимости более точно. В первом приближении, можно сделать вывод, что двукратное увеличение параметра σ_w приводит к уменьшению значений f на 10-20%. Так как понижение частоты ведет к снижению разрешающей способности метода георадиолокации, можно заключить, что в пресных водоемах разрешающая способность будет выше чем в минерализованных.

3.3 Физическое моделирование с применением метода георадиолокации.

Моделирование различных геологических сред является распространенным инструментом исследования теоретических и слабо изученных вопросов георадиолокации. Так как геологические разрезы, изучаемые в реальных условиях, зачастую обладают сложным и дифференцированным строением, данные георадиолокации могут не соответствовать общим теоретическим представлениям и быть сложными для интерпретации. Это делает поиск методом лабораторного

моделирования дополнительных факторов, влияющих на распространение электромагнитного сигнала в среде весьма актуальным. Как отмечается в работе М.Л. Влдова и А.М. Пятиловой, физическое моделирование может обеспечить изучение динамических характеристик георадарной записи (Владов, Пятилова, 2015). Эти же авторы указали на возможность выявления аномальных эффектов георадиолокации при лабораторных измерениях (Владов, Пятилова, 2016).

Лабораторный эксперимент, показанный в статье, выполнялся в измерительной ячейке, представляющей собой пластиковый бак габаритами 1300x500x400 мм. Он был наполнен песком, мощность которого составила 300 мм. Песок средне-мелкозернистой фракции (ГОСТ 8736-9), со следующим минеральным составом: кварц – 72%, плагиоклаз – 24%, глинистое вещество – 2%, тонкозернистые агрегаты – 2%. Модуль крупности песка – 1,67, коэффициент фильтрации – 6,5 м/сут. В центральной части бака было сделано углубление размером 500x500x250 мм, в котором создавалась неоднородность, представляющая собой валуны и гравий, расположенные с определенной геометрией. Линейные размеры валунов в среднем 100 мм, гравия 40 мм. На первом этапе использовался материал гранитного состава. А на втором этапе валуны из шунгитовых пород. На протяжении эксперимента, водопроводной водой производилось увлажнение всей модели.

Съемка проводилась по сети профилей, расположенных вдоль всей длины бака, расстояние между профилями составляло 50 мм. В зоне неоднородности модели выполнялась дополнительная съемка с шагом 5 мм, направление которой было перпендикулярно основному ходу движения антенны. Данные регистрировались и обрабатывались в программном обеспечении GeoScan 32. Наряду с этим, при помощи электроразведочного генератора SGD-EGC «SKAT-II» и измерителя SGD-EET «MEDUSA», производились измерения параметра кажущегося удельного сопротивления (ρ_k). Съемка производилась четырех электродной симметричной установкой, длина питающей линии от 600 до 900 мм, приемной – от 200 до 300 мм, ток составлял 1 мА. Так же, с помощью кондуктометра «COM-100» установлено ρ_k водопроводной воды в среднем равное 150 Ом·м. Влагомером «MS 310S», проводились регулярные измерения средней

относительной влажности (W) модели. Всего было изучено три модели, отражающие разные геологические обстановки.

Модель №1 включала в себя валуны размерами 80 – 100 мм. Гранитный состав валунов позволяет предположить для них $\varepsilon = 5 - 6$, а $\rho_k = 10 - 15$ кОм·м. Укладка валунного материала осуществлялась упорядочено, в несколько слоев, через фиксированное расстояние в 100 мм. Пример общих параметров для песчано-гравийной смеси приводится в монографии (Владов, Старовойтов, 2004). Они составляют в нормальном состоянии $\varepsilon = 4 - 9$, а $\rho_k = 1,2 - 50$ кОм·м, а в водонасыщенном $\varepsilon = 10 - 20$, а $\rho_k = 0,6 - 3$ кОм·м (при слабой минерализации поровой влаги). Так как мощность толщи песка является известной величиной, а граница нижнего основания бака четко выделяется на каждой радарограмме. На протяжении всего эксперимента модель подвергалась ступенчатому увлажнению. Увлажнение началось со значения W толщи в 12% и закончилось на отметке 66%. Так же интересен факт, что в области расположения валунов и гравия уровень влажности в среднем на 10% выше, чем во вмещающей толще песка. Этот эффект связан с возможной сорбцией влаги на поверхности валунов. В зоне ρ_k закладки соответствовало значению порядка 1700 Ом·м, при средней влажности 25%.

Модель №2 подобна модели №1 по физическим параметрам, но отличается размерами и геометрией включений. Вместо валунов использовался гравий с размерами 30 – 50 мм. Сеть закладки была сгущена, до сети 50 на 50 мм. Измерение ρ_k составило порядка 1770 Ом·м при $W=25\%$, модель также подвергалась ступенчатому увлажнению, как и при использовании более крупных валунов. Размеры гравия были выбраны исходя из условий образования дифрагированной волны, в соответствии с которым, размеры дифрагирующего объекта должны быть меньшими или соизмеримыми с длиной ЭМ волны в среде. Профили влажности показал схожие с первой моделью результаты, были выделены максимумы в зоне закладки. Среднее значение W толщи составило 68%, а величина ρ_k в текущих условиях 365 Ом·м.

В модели №3, близкие по минеральному составу и электрическим свойствам к вмещающему песку валуны были заменены на шунгитовые. Шунгит – минерал, распространенный в центральной части Республики Карелия на Заонежском полуострове. Главной особенностью пород содержащих шунгит является

значительное содержание углерода – до 95%. В результате чего, они являются мощными проводниками электрического тока и обладают пониженными значениями ρ_k , составляющие от 10^{-3} до 10^{-5} Ом·м. Шунгитовый материал, используемый в данном эксперименте, отобран на месторождение “Зажогоино” и содержит в своем составе не менее 30% углерода. Для данной породы ε составляет 8,3 ед. СИ, при частоте в 1 ГГц и ρ_k $1 \cdot 10^{-3}$ Ом·м (Мошников и др., 2007; Kwiecinska all, 2007). Размеры валунов варьировалась от 100 до 120 мм, укладка производилась через 100 мм. В случае использования шунгита ρ_k толщи составило 650 Ом·м при $W = 25\%$, что в три раза меньше значений полученных в двух предыдущих моделях при схожем уровне влажности. Максимальное значение W толщи составило 72%, при данных условиях величина $\rho_k = 319$ Ом·м.

Результаты эксперимента показали, что регистрируемое волновое поле зависит от ряда нестационарных эффектов, совокупность которых сильно меняют получаемую картину. Значительное влияние на георадарный сигнал оказывает влажность среды. Вариации влажности приводят к изменению проводимости среды, что, в свою очередь, оказывает комплексное воздействие на распространение ЭМ волны. На рисунке 11 показан график зависимости ρ_k и ε от относительной влажности полученный в ходе эксперимента для модели №1. Видно, что ρ_k и ε взаимнообратные величины, которые зависят от содержания влаги. Изменение свойств идет ступенеобразно, а в интервале $W = 40 - 45\%$ локализуется область пересечения, где начинается резкий рост показателей.

При этом происходит комплексное воздействие на сигнал: скорость волны уменьшается с 16,0 см/нс до 7,5 см/нс, увеличивается поглощение, а также меняется коэффициент отражения. При начальных условия с низкой влажностью $K_{отр} = -0,05$, а на заключительном этапе $K_{отр} = 0,3$. Таким образом, изменение $K_{отр}$ в 6 раз позволило сформироваться достаточно интенсивной дифрагиронной волне, даже при рассеивании и ослаблении сигнала (изменение коэффициента затухания с 0,08 до 0,28). Это хорошо прослеживается по увеличению интенсивности проявления гипербола.

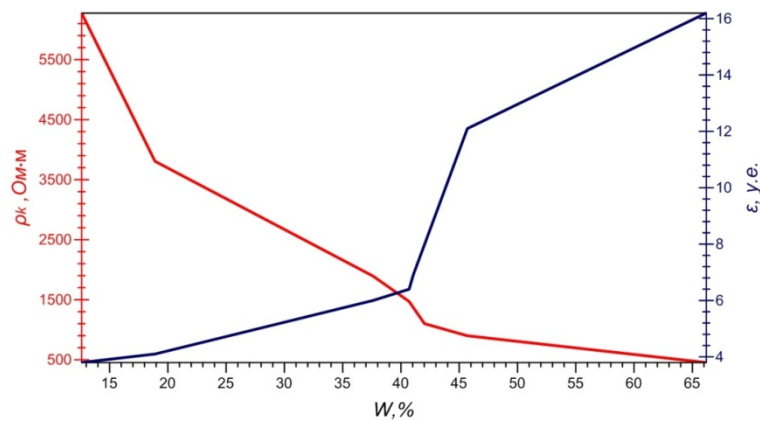


Рис. 11 – График зависимости ρ_k и ϵ толщи от значения средней относительной влажности.

Кроме того, повышение проводимости среды приводит к смещению спектра сигнала и его центральной частоты, как было показано, например, в диссертационной работе Христофорова И.И. (Христофоров, 2013). Из рисунка 12 видно, что при увеличении влажности происходит последовательное уменьшение f_c с 1,567 ГГц до 0,935 ГГц. Этот эффект приводит к изменению длины волны, в данном случае увеличению с 80 мм до 100 мм, и, как следствие, изменению разрешающей способности метода. Совокупность всех этих факторов и формирует георадарный образ локальных объектов в волновом поле.

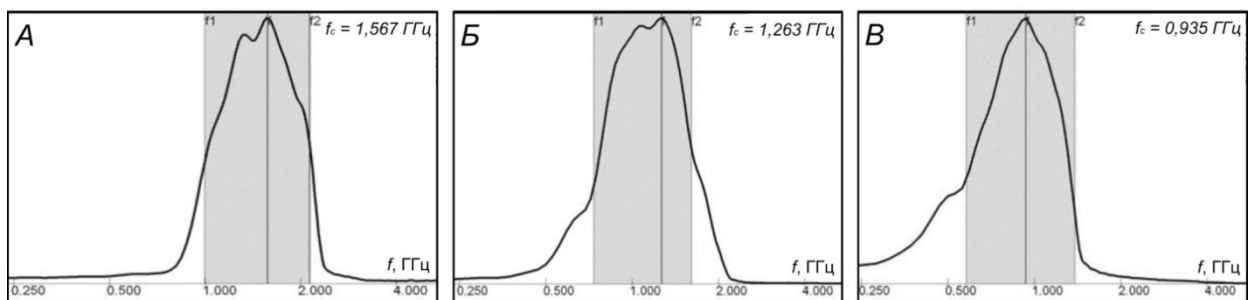


Рис. 12 – Частотные спектры радарограмм с разной W:
А – W = 13%, Б – W = 38%, В – W = 66%.

Эффект от изменения электрофизических свойств локального объекта хорошо прослеживается на примере модели №3, что наглядно видно по интенсивно проявленным гиперболам даже при относительно небольшом увлажнении. Обусловлено такое явление высокой проводимостью шунгита, в результате чего происходит возрастание $K_{отр}$ даже при $\epsilon = \text{const}$. Данный вопрос рассмотрен в (Владов, Судакова, 2017), где приведен метод вычисления $K_{отр}$ в случае наличия резкого контраста проводимости и показано, что отражение может меняться в разы.

Дальнейшее увлажнение модели приводит к еще большему контрасту, так как начинает вносить свой вклад разность ϵ . Из-за комплексного влияния электрофизических свойств формируется мощный отраженный сигнал. Это можно проверить, сопоставив записи гранитных и шунгитовых валунов при равной W (рис.13). В первом случае амплитуда сигнала меняется в пределах -5400 – 4700 у.е. (рис.13А), а для второго -15600 – 13800 у.е. (рис.13Б). Интересным фактом является смена полярности сигнала. Подобный эффект может возникать в результате пересечения сигналом сред с контрастом сопротивлений, как например показано в (Markovaara-Koivisto et al, 2014). Наряду с этим не исключено влияния поляризации сигнала за счет расположения антенн (Н и Е поляризация). В работах [19, 18] на основании лабораторных экспериментов демонстрируется, как от изменения взаимного расположения антенн меняются динамические показатели сигнала.

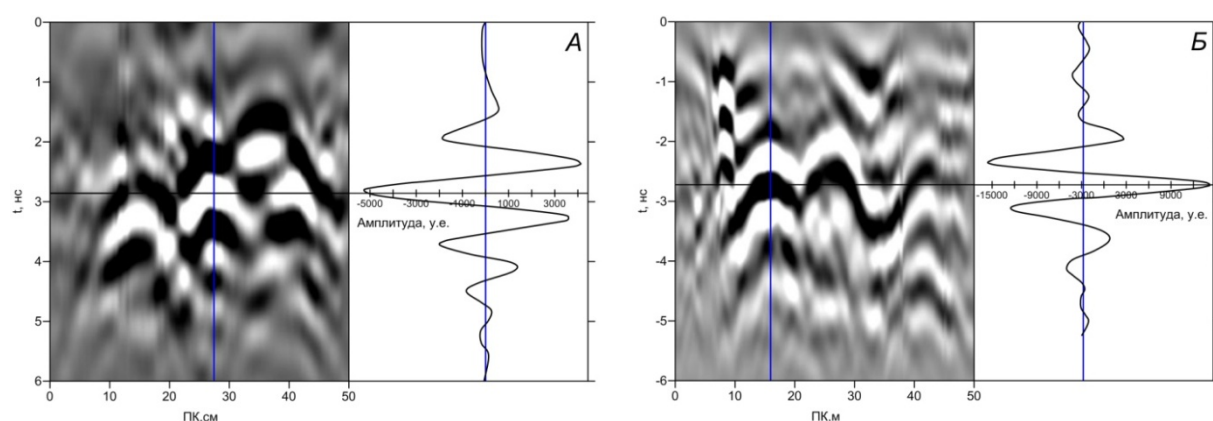


Рис. 13 – Гипербола дифрагированной волны и трасса в ее вершине для модели №1 (А) и модели № 3 (Б).

Таким образом, сочетание разных факторов и формирует сложную волновую картину («хаотичную»), которая наблюдается при выполнении полевой съемки на песчано-гравийных отложениях. Она включает отдельные гиперболы, фрагменты осей синфазности, области затухания и т.д. Так как эти факторы обусловлены как внутренними (природными), так и внешними (аппаратурными) факторами на данном этапе выделить некоторые разности в подобном случае без привлечения априорной информации практически невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование доказывает целесообразность и полезность изучения гляциальных и флювиогляциальных отложений Фенноскандинавского щита методом георадиолокации. В ходе работы была установлена высокая сходимость данных получаемых при помощи прямого геологического отбора с результатами интерпретации радарограмм. Выполненное в рамках исследования физическое моделирование позволило экспериментально доказать, что при помощи георадиолокации возможно выделять зоны повышенной концентрации валунного и гравийного материала.

Выводы

1. Применение метода георадиолокации для изучения флювиогляциальных отложений позволяет получать широкий спектр данных. Использование георадара позволяет выполнить послойный фациальный анализ месторождений, а также определять элементы залегания песчано-гравийных толщ, выделять границы подстилающих литотипов и устанавливать положение выходов коренных пород к поверхности.

2. Доказана эффективность метода георадиолокации при изучение озовых гряд. Установлено, что на данные получаемые с использованием георадара обладают высокой информативностью и глубиной исследования, в сравнении с традиционными методами геологического опробования толщи. Наблюдается уверенная корреляция полученных данных с результатами исследований ученых геологов.

3. Обнаружена продуктивность использования метода георадиолокации для литостратиграфического анализа донных осадков малых водоемов Фенноскандинавского щита. Данный факт обусловлен ледниковым генезисом озер Карело-Кольского региона и как следствие их повышенной пресностью.

4. Получены данные позволяющие рекомендовать метод георадиолокации для выделения и локализации сейсмодислокационных нарушений в донных осадках малых водоемов. Предложен способ изучения проявлений палеосейсмичности на Фенноскандинавском щите.

5. Исследованы кинематические и динамические параметры георадарного сигнала при зондировании песчано-гравийной смеси (ПГС) в ходе физического моделирования. Установлено влияние влажности грунта и, как следствие, его проводимости, на регистрируемый сигнал. Получены предпосылки для определения содержания крупной фракции в ПГС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю глубокую и искреннюю благодарность своему научному руководителю, заведующему лабораторией геофизики ИГ КарНЦ РАН д.г.м.-н. Шарову Николаю Владимировичу за руководство научными исследованиями, ценные консультации и методическую помощь, оказанные в процессе выполнения работы. Благодарю своих коллег, которые принимали участие в сборе полевых данных. Также благодарю своего коллегу - старшего научного сотрудника лаборатории геофизики ИГ КарНЦ РАН к.г.м.-н. Рязанцева Павла Александровича, за оказанную помощь и важные теоретические и практические рекомендации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК:

Рязанцев П.А., Родионов А.И. Опыт комплексирования георадиолокации и динамических зондирований при изучении акватории Онежского озера // Вестник ВГУ серия геология, 2015. –С. 100–103.

Родионов А.И., Рязанцев П.А. Георадиолокационное изучение ледниковых отложений в юго-западной Карелии озера // Вестник ВГУ серия геология, 2017. –С. 123–129.

Родионов А.И., Рязанцев П.А. Оценка параметров георадарного сигнала в условиях физического моделирования песчано-гравийной толщи // Геофизика, 2017. –С. 57–64.

Материалы конференций:

Родионов А.И. Рязанцев П.А. Георадиолокационное изучение малых озер в Карелии // XIX Уральская молодежная школа по геофизике. Сборник материалов. 2018. С. 143-145.

Родионов А.И. Оценка крупности песчано-гравийной смеси методом георадиолокации // XVIII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. Пермь: ГИ УрО РАН. 2017. С. 166-169.

Родионов А.И., Рязанцев П.А. Георадарное изучение озовых гряд Заонежья // Современные проблемы четвертичной геологии и географии Северо-запада Европейской части России и сопредельных стран. Материалы научной сессии (с участием иностранных специалистов), посвященная 100-летию со дня рождения Галины Сергеевны Бискэ. Петрозаводск. 2017. С. 113-116.

Родионов А.И. Выделение локальных объектов в песчано-гравийной толще методом георадиолокации // Материалы конференции «Науки о Земле: задачи молодых Материалы 69-й научной школы конференции студентов, аспирантов, и молодых ученых посвященной 200-летию Российского минералогического общества. 2017. С. 56 – 59.

Родионов А.И. Георадиолокационное обследование ледниковых форм рельефа в Карелии при разведке месторождений песка и ПГС // XVII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2016. С. 164-166.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы были представлены в виде стендовых и устных докладов на ведущих тематических конференциях и семинарах международного и российского уровня:

17th International Conference on Ground Penetrating Radar (Rapperswil, Switzerland, 2018);

Уральская молодежная геофизическая школа (Екатеринбург, 2016, 2018; Пермь 2017);

Международный геофизический научно-практический семинар «применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2016);

Международная научно-практическая конференция «Георадар 2017» (Москва, 2017).

СПИСОК ПРОЕКТОВ

В научно-квалификационную работу вошли результаты, полученные в ходе выполнения государственного задания ИГ КарНЦ РАН на тему: «Геолого-геофизические модели и сейсмичность юго-восточной части Фенноскандинавского щита» (ГР № 01200954697). Часть результатов была получена при выполнении грантов РФФИ: № **18-35-00020\18** мол_а «Изучение параметров георадарного сигнала при физическом моделировании разных геологических условий», Руководитель: Родионов А.И., № **17-35-50079** мол_нр (2017-2018 гг.) «Поиск и локализация нарушений и деформаций в четвертичных отложениях восточной части Фенноскандинавского щита методом георадиолокации» - руководитель Николаева С.Б., ГИ КНЦ РАН, исполнитель Родионов А.И.