

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Тарасова Мария Александровна

**Разработка методики интерпретации георадарных
данных с использованием параметрических и
лабораторных измерений физических свойств песчано-
глинистых отложений**

1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: *Бричева Светлана Сергеевна*, кандидат геолого-минералогических наук
Владов Михаил Львович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: *Шипилов Сергей Эдуардович* доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, профессор кафедры радиофизики радиофизического факультета
Лунина Оксана Викторовна доктор геолого-минералогических наук, Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории тектонофизики
Рязанцев Павел Александрович кандидат геолого-минералогических наук, Институт геологии – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник лаборатории четвертичной геологии и геоэкологии

Защита диссертации состоится 15 апреля 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

E-mail: dmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3821>

Автореферат разослан «__» марта 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ 016.6,
кандидат технических наук

К. М. Кузнецов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Тема интерпретации георадарных данных является актуальной на сегодняшний день и связано это с тремя основными причинами.

Первая заключается в том, что метод георадиолокации помимо инженерной отрасли широко применяется для изучения сред природного происхождения. Основной областью изучения метода является верхняя часть разреза, представленная песчано-глинистыми отложениями. Это сложный неоднородный агрегат, который в поле электромагнитных волн радиодиапазона обладает слабыми контрастами. В таких физических условиях природа образования отраженных электромагнитных волн недостаточно изучена, что может приводить к необоснованной геологической трактовке георадарных данных.

Вторая причина связана с тем, что метод георадиолокации применяется в областях археологии, седиментологии, геоморфологии в первую очередь для межскважинной корреляции интересующих границ. Эта задача подразумевает выполнение одного из основных этапов интерпретации - привязки осей синфазности отраженных волн (далее георадарных отражений) к границам, выделенным в точке независимого наблюдения (скважина, шурф). Однако, геологическая привязка является неоднозначной, то есть наблюдаемых георадарных отражений может быть больше или меньше, чем границ в скважине. Это является следствием особенностей распространения электромагнитных волн в толще песчано-глинистых отложений, а также отличных способов классификации границ у исследователей разного профиля: археолог опишет разрез иначе, чем инженер-геолог.

Метод георадиолокации также используется в почвоведении для косвенной оценки влажности. Количественная интерпретация требует перехода от комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) к физическим параметрам с помощью калибровочных зависимостей (кривых). Однако, большинство существующих калибровочных кривых построено на основе полевого метода измерения электромагнитных свойств TDR (time domain reflectometry), работающего во временной области, что снижает их применимость к георадарным данным, приуроченным к частоте излучающей антенны. Появляются лабораторные методы измерений в широкой полосе частот, соответствующего набора калибровочных зависимостей для них пока недостаточно, что ограничивает развитие количественной оценки свойств почв.

Третья причина связана с быстрым развитием новых вычислительных технологий, которые предоставили возможность моделирования георадарного отклика (решения прямой задачи) от неоднородных сред с различной геометрией. Но на данный момент они не внедрены в процедуру интерпретации подобно тому, как похожие технологии реализованы в области сейсморазведки (сейсмостратиграфическая привязка отражений к скважинным данным).

Таким образом, в условиях быстро развивающихся вычислительных возможностей и приборной базы, растущих требований к детальности и точности изучения верхней части разреза, актуальным является соответствующее развитие методики интерпретации георадарных данных.

Степень разработанности

Тема интерпретации георадарных данных отражена в работах зарубежных и отечественных исследователей, что говорит о высокой изученности вопроса.

Первые публикации, содержащие указания и рекомендации по проведению качественной интерпретации георадарных данных появились в середине 90-х гг. прошлого века и относились к методу радарной стратиграфии (Jol, Smith, 1991; Smith, Jol, 1992; Bristow, 1995; Neal, Roberts, 2000, 2001). Метод хорошо себя зарекомендовал в решении задач седиментологии и геоморфологии. С ростом применения метода исследователи заметили наличие дополнительных георадарных отражений, не наследующих литологическую последовательность, зафиксированную в скважине. Позже такие отражения получили название «нестратиграфические», возникновение которых связали с изменением физических свойств (температуры, влажности, плотности) внутри стратиграфических единиц (Neal, 2004). Наличие данного явления наряду с интерференцией в тонких слоях (Moore et al., 2004; Guha et al., 2005) приводит к образованию дополнительных георадарных отражений, геологическую привязку которых без измерений электромагнитных и петрофизических свойств выполнить невозможно (Старовойтов, 2023).

Думая над этой проблемой, исследователи пришли к выводу, что для более уверенной интерпретации важно понимать природу и происхождение наблюдаемых георадарных отражений. Поэтому в начале 2000-х г. была опубликована серия работ с примерами количественного сравнительного анализа георадарных и седиментологических данных на основе измерений электромагнитных свойств и моделирования георадарного отклика (van Dam, Schlager,

2000; Corbeau et al., 2001; van Dam et al., 2002; van Dam et al., 2003; Kruse, Jol, 2003). Эти методики не получили дальнейшего развития в связи с ограничениями на тот момент вычислительных возможностей.

Интерпретация георадарных данных в задачах почвоведения подразумевает оценку влажности. Для этого на этапе обработки применяются разные методы определения скорости электромагнитных волн: по годографу отраженной волны (van Overmeeren et al., 1997), грунтовой (Ardekani, 2013), коэффициенту поверхностного отражения (Lambot et al., 2008); по методу Early Time Signal (ETS) analysis (Pettinelli et al., 2007). Но большее распространение получил метод TDR (Topp and Davis, 1985), позволяющий путем использования калибровочной кривой, выполнять пересчет значений ДП в объемную влажность. Для данного метода разработано большое количество калибровочных кривых, но наиболее популярная была получена в работе (Topp et al., 1980).

Позже стали развиваться лабораторные методы измерения (Curtis, 2001; Shenhui et al., 2003). Но они требуют построения новых калибровочных зависимостей, желательно для разных типов отложений и частот измерений. На данный момент разработкой таких калибровочных зависимостей и изучением релаксационных процессов в почвах занимаются отечественные ученые (Бобров и др., 2019, Крошка, 2021).

Параллельно для целей интерпретации учеными проводился сбор и систематизация данных о величине ДП горных пород (Parkhomenko, 1967; Olhoeft, 1987; Daniels et al., 1995; Neal, Roberts, 2000). Имеющиеся справочные данные теряют актуальность из-за расширения спектра исследуемых георадаром отложений и повышения требований к точности оценок ДП.

В последнее десятилетие были разработаны методы полноволновой инверсии георадарного сигнала (FWI), основы алгоритма которой представлены в работах (Ernst et al., 2007; Meles et al., 2010). По настоящее время эти методы развиваются: внедряются данные шума, улучшаются алгоритмы для данных георадарного профилирования (Feng et al., 2019). Однако по-прежнему инверсия требует больших вычислительных затрат и в большинстве случаев опробована на данных скважинного георадара.

Цель диссертационной работы заключается в разработке методики интерпретации георадарных данных, обеспечивающей точную привязку георадарных отражений к границам, выделенным в точке независимого наблюдения и решении, на основе ее применения,

некоторых прикладных задач геоморфологии, геoarхеологии и почвоведения.

Задачи

1. Рассмотреть существующие связи между петрофизическими и электромагнитными свойствами песчано-глинистых отложений и определить доминирующие факторы формирования контрастов электромагнитных свойств в толще песчано-глинистых отложений.
2. Оценить сходимость результатов лабораторного и полевого методов измерения ДП на примере песчано-глинистых отложений.
3. Разработать технологию построения электрофизической модели по измеренным значениям ДП.
4. Разработать метод совместного анализа набора данных: гранулометрический состав, весовая влажность, электрофизическая модель, смоделированные и полевые георадарные данные, для выполнения точной геологической привязки георадарных отражений.
5. Разработать базу данных значений ДП песчано-глинистых отложений и калибровочные зависимости для лабораторного метода измерения электромагнитных свойств в широком диапазоне частот.

Методология и методы исследования

Для выполнения определенных выше задач использовалась следующая методология:

1. Определение петрофизических свойств песчано-глинистых отложений: гранулометрического состава с помощью лазерного анализатора размера частиц Microtrac Bluewave (Россия).
2. Определение электромагнитных свойств песчано-глинистых отложений лабораторным методом в коаксиальной ячейке (НПО «Терразонд»), полевым методом с помощью прибора TDR200 (Campbell Scientific, USA).
3. Георадарное профилирование с использованием георадара ОКО-3 (Геотех, Россия) с частотой антенн 400, 900 МГц.
4. Полноволновое 2D моделирование в gprMax (программное обеспечение с открытым исходным кодом).
5. Программирование авторских алгоритмов для количественного сравнения модельных и полевых данных.

Научная новизна исследования

Впервые для песчано-глинистых отложений были получены база данных измерений ДП для набора частот (100, 250 и 500-1000 МГц) с привязкой к гранулометрическому составу, весовой влажности образца, частоте измерения, геоморфологической позиции; набор частотно-зависимых калибровочных кривых (для 100, 250 и 500-1000 МГц) для лабораторного метода измерения ДП. Впервые проведён

сравнительный анализ сходимости методов измерения электромагнитных свойств (полевого и лабораторного). Установлены количественные расхождения между методами и определены условия, при которых их данные являются взаимозаменяемыми для целей интерпретации. Уточнены границы «георадарного плато» — диапазона частот с минимальной дисперсией ДП: установлено, что для песчано-глинистых отложений этот диапазон составляет 500 – 3000 МГц. Впервые на радарограмме были обнаружены георадарные отражения, отвечающие границам с коэффициентом отражения, меньше 0.1.

Теоретическая значимость работы

Исследование подтверждает резкое убывание ДП в диапазоне от первых МГц до 500 МГц у песчано-глинистых отложений, что приводит к смещению левой границы георадарного плато в область высоких частот. Этот результат значим с точки зрения учета дисперсии при разработке частотно-зависимых калибровочных кривых.

Практическая значимость работы

Разработан способ построения калибровочных зависимостей, необходимый для метрологического обеспечения лабораторного метода измерения электромагнитных свойств.

Полученные в работе методические рекомендации позволяют выполнить точную привязку георадарных отражений к границам с любой физической природой (изменением температуры, солености, плотности, степени трещиноватости). Значения ДП из составленной базы данных могут быть использованы для интерпретации, в частности, при переводе радарограммы в глубинный масштаб.

Защищаемые положения

1. Разработанный способ построения частотно-зависимых калибровочных кривых позволяет воспроизводить значения петрофизических параметров по результатам лабораторных измерений комплексной диэлектрической проницаемости.

2. Предложенная методика интерпретации позволяет построить физически обоснованную модель среды и произвести однозначную привязку георадарных отражений к границам, выделенным в точке независимого наблюдения с помощью разных подходов к классификации изучаемого разреза.

3. Разработанный алгоритм интерпретации позволяет идентифицировать на радарограмме нестратиграфические отражения.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов измерений электромагнитных и петрофизических свойств обеспечивается использованием сертифицированных измерительных приборов и

проверенной методикой измерений, совпадением части измерений с результатами, полученными другими исследователями.

Апробация результатов исследования проводилась в рамках научно-практических конференций: «ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», Москва, 2024; «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», Москва, 2025; «Почвоведение: Горизонты будущего. 2023», Москва, 2023; «Инженерная и рудная геофизика 2023», Санкт-Петербург, 2023 и на научных семинарах «Современные проблемы геофизики и рудной геологии».

Публикации

Основные идеи и положения работы изложены в 4 научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Личный вклад автора

В ходе экспедиций Института географии РАН автор совместно с коллегами принимала непосредственное участие в решении задач геоморфологии и геoarхеологии с помощью метода георадиолокации для представленных в работе материалов (Глава 5), в том числе в проведении георадарного профилирования, отборе и описании образцов из скважин, измерении петрофизических и электромагнитных свойств на образцах, интерпретации георадарных данных. Подготовленные результаты были отражены в работе (Bricheva et al., 2024), где автору диссертации принадлежит равный с соавторами вклад.

Совместно с коллегами из Почвенного института имени В. В. Докучаева для решения задачи по межскважинной корреляции почвенных горизонтов, автором лично была проведена площадная георадарная съемка, измерены электромагнитные свойства почв и их гранулометрический состав, выполнена привязка георадарных отражений к границам в скважине. Полученные данные были использованы для значительного пополнения базы данных значений ДП (на 50 записей), представленной в работе (Глава 2). Подготовленные результаты были отражены в работе (Бричева и др., 2025), где автору диссертации принадлежит равный с соавторами вклад.

Все описанные в диссертации этапы методики интерпретации, обеспечивающие точную геологическую привязку георадарных отражений, были разработаны автором самостоятельно. Автор лично разработала алгоритм построения электрофизической модели и калибровочных кривых, спроектировала и реализовала физический эксперимент для оценки сходимости полевого и лабораторного методов

измерения электромагнитных свойств, выполняла численное моделирование, что было отражено в работах (Тарасова и др., 2025; Тарасова и др., 2025) (Главы 3, 5), где вклад автора диссертации был определяющим.

Автор принимала активное участие в формулировании научных задач, обобщении и анализе итоговых материалов, и передаче их в печать. Автором была проделана существенная работа над текстом статей, включая их предоставление в редакции журналов, перевод на английский язык, а также ведение переписки с редакторами и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 168 наименований, 12 таблиц. Работа содержит 47 рисунков. Общий объем работы составляет 151 страницу.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследований, практическая значимость и научная новизна работы, методология и методы исследования, степень достоверности, личный вклад, информация о научных публикациях, а также сформулированы 3 защищаемых положения.

Глава 1. Обзор подходов к интерпретации георадарных данных в геологических приложениях

Первым методом интерпретации георадарных данных стала радарная стратиграфия, разработанная для решения задач седиментологии и геоморфологии. Этот метод позволял качественно разделять толщу отложений на осадочные комплексы и фации до стадии бурения.

Со временем перед георадиолокацией была поставлена задача межскважинной корреляции, что сместило акцент интерпретации в сторону привязки георадарных отражений к границам, зафиксированным в скважине. Однако, выявленные по разным причинам расхождения в количестве георадарных отражений и границ в скважинах сузили область применения радарной стратиграфии, которая не позволяла решить данную проблему.

В связи с этим начали разрабатываться методы, направленные на физическое обоснование связи между георадарным отражением и границей в точке независимого наблюдения. Такие подходы требовали дополнительной информации: измерений петрофизических и

электромагнитных свойств отложений, отбора керна, моделирования георадарного отклика. Несмотря на свою перспективность, эти методы не получили широкого развития в связи с недостатком на тот момент вычислительных возможностей.

Параллельно развивались методы интерпретации для почвенных исследований. Большинство из них нацелено на количественную оценку скоростей электромагнитных волн с последующим пересчётом в объёмную влажность с помощью калибровочных кривых. Такие зависимости были разработаны преимущественно для калибровки полевого прибора TDR, в то время как растёт популярность лабораторных методов.

В последние годы активно развиваются инверсионные подходы, основанные на лучевом и полноволновом моделировании. Алгоритмы инверсии на данный момент не используются повсеместно из-за больших вычислительных затрат.

Таким образом, существующие методы интерпретации не решают проблему неоднозначной геологической привязки георадарных отражений, а также не предоставляют универсальных калибровочных зависимостей для оценки физических свойств отложений. Перспективным направлением представляется дальнейшее развитие комплексного подхода, интегрирующего данные о петрофизических и электромагнитных свойствах отложений с современным моделированием георадарного отклика с учётом актуальных технических и цифровых возможностей. Построение калибровочных кривых для лабораторного метода измерения электромагнитных свойств.

Глава 2. Петрофизические и электромагнитные свойства песчано-глинистых отложений

В работе в качестве объекта исследования выбраны песчано-глинистые отложения по следующим причинам, во-первых, они представляют собой рыхлые обломочные породы четвертичного возраста, широко распространённые в верхней части разреза; во-вторых, эти отложения формируют типичные объекты исследований в седиментологии и геоморфологии; в-третьих, большинство почв образуется на рыхлых обломочных породах и наследует их минеральный и гранулометрический состав.

Диэлектрическая проницаемость песчано-глинистых отложений. Создание базы данных

Гранулометрический состав и влажность — наиболее распространённые петрофизические параметры в исследованиях геоморфологов, почвоведов и геoarхеологов. Поэтому они были

выбраны автором в качестве необходимых и достаточных для использования в предлагаемой методике интерпретации.

Песчано-глинистые отложения в поле электромагнитных волн радиодиапазона являются сложными многокомпонентными трехмерно неоднородными объектами. Для песков, супесей и суглинков характерны широкие и перекрывающиеся между собой диапазоны значений ДП. Это связано с наличием в составе отложений частиц глинистой и пылеватой фракций, присутствие которых приводит к сочетанию различных типов пористости и воды. С точки зрения интерпретации, данные особенности затрудняют разделение разных типов песчано-глинистых отложений по электромагнитным свойствам, формируя слабоконтрастный разрез с преобладанием границ 2 рода.

Частицы глинистой размерности во влажных отложениях приводят к увеличению количества межфазных границ. Возникающая поляризация Максвелла-Вагнера на таких границах приводит к резкому убыванию значений ДП в диапазоне от первых МГц до 500 – 1000 МГц, что противоречит устоявшимся представлениям о частотном диапазоне георадарного плато (первые МГц-первые ГГц) (Владов, Судакова, 2017).

В работе не анализируется отдельно мнимая часть ДП в силу установленной низкой проводимости исследуемых песчано-глинистых отложений.

Для интерпретации была создана база данных, содержащая измеренные лабораторным методом значения ДП песчано-глинистых отложений. Записи в базе привязаны к гранулометрическому составу, весовой влажности и частоте измерения. Значения ДП были сняты с частот 100 МГц, 250 МГц и в диапазоне 500 – 1000 МГц. Выбор частот обусловлен используемыми георадарными антеннами и новыми данными о границах георадарного плато. База данных включает 120 образцов, отобранных из различных регионов страны и геоморфологических позиций.

Связи диэлектрической проницаемости с петрофизическими параметрами. Построение калибровочных зависимостей

Калибровочные зависимости играют ключевую роль в интерпретации георадарных данных при решении задач почвоведения. Они необходимы для корректного пересчета измеренных значений ДП в объемную или весовую влажность почв. Для наиболее популярного полевого метода измерения TDR, в работе (Торп et al., 1980) было получено калибровочное уравнение для оценки содержания воды в почвах. Существуют и другие полиномиальные зависимости (Roth et al.,

1992; Hallikainen et al., 1985), однако, они все имеют ограничения. Не существует универсального калибровочного уравнения, поэтому современные исследователи настаивают на построении частных зависимостей для конкретно изучаемых типов отложений, почв, приборов и частот измерения ДП для снижения погрешности расчетов (Бобров и др., 2019, 2023).

В связи с этими фактами, в работе были построены частотно-зависимые калибровочные кривые для расчета весовой влажности песчано-глинистых отложений по измеренным лабораторным методом значениям ДП на частотах 100 МГц, 250 МГц, где величина действительной части ДП завышена из-за дисперсии, и в интервале 500-1000 МГц, где дисперсии не наблюдается.

$$w_1 = 0.004 * \varepsilon_1^3 - 0.191 * \varepsilon_1^2 + 3.448 * \varepsilon_1 - 4.896 \quad (1)$$

$$w_2 = 0.005 * \varepsilon_2^3 - 0.238 * \varepsilon_2^2 + 3.763 * \varepsilon_2 - 5.016 \quad (2)$$

$$w_3 = 0.003 * \varepsilon_3^3 - 0.156 * \varepsilon_3^2 + 2.716 * \varepsilon_3 - 1.863 \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – ДП, измеренные на частотах соответственно 100, 250, 500-1000 МГц; w_1, w_2, w_3 – отвечающие им весовые влажности, %

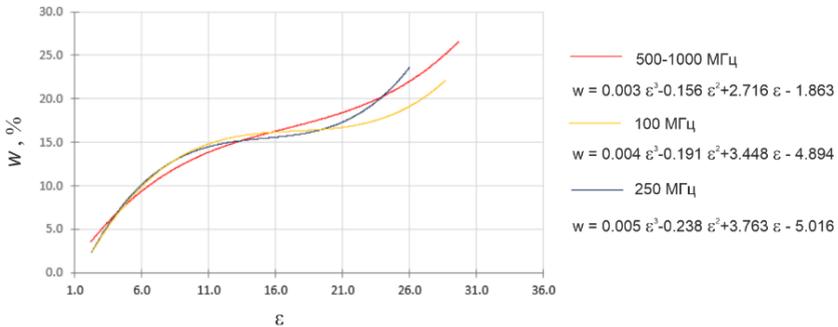


Рисунок 1. Частотно-зависимые калибровочные кривые для лабораторного метода измерения

Глава 3. Инструментальные полевые и лабораторные методы измерения электромагнитных параметров

Полевой метод. Рефлектометрия во временной области (TDR)

Метод основан на измерении времени прохождения импульса в разомкнутом отрезке двухпроводной линии (зонд), погруженной в почву, от генератора до разомкнутого конца и обратно. Время

прохождения импульса определяется скоростью распространения электромагнитных волн в материале. Результатом измерения является одно значение ДП и проводимости.

Преимущества метода заключаются в возможности измерения ДП почв и грунтов в естественном состоянии, например, в стенке шурфа или карьера. Недостатком метода считается неопределенность в соотношении измеренного значения ДП с определенной частотой, так как метод работает во временной области.

Лабораторный метод. Коаксиальная ячейка

Метод измеряет ДП жидких и сыпучих материалов в широком диапазоне частот от 10 кГц до 4.5 ГГц. Измерения выполняются с помощью векторного анализатора цепей и коаксиальной ячейки, заполняемой исследуемым образцом. Комплексный коэффициент отражения ячейки с веществом пересчитывается в величины действительной и мнимой частей ДП и проводимости на каждой частоте.

Преимущество метода состоит в необходимом малом объёме (около 5 см³) образца и возможности измерения в широком частотном диапазоне. Недостатки связаны с требованием подготовки образца: механической обработкой, уплотнением. Это приводит к нарушению естественного сложения породы, изменению плотности, пористости и объёмной влажности.

Физический эксперимент по сравнению полевого и лабораторного методов

Замена одного метода на другой приводит к расхождениям в измеренных значениях за счет изменения состояния образца по сравнению с естественным состоянием грунта. Однако, не было найдено исследований, количественно выражающих эти расхождения.

Для восполнения этого пробела в рамках работы автором был поставлен физический эксперимент. Его целью было сравнительное измерение электромагнитных параметров искусственных песчано-глинистых отложений полевым и лабораторным методами с последующей количественной оценкой возникающих между ними расхождений. Значение проводимости не анализировалось, так как она имеет выраженную частотную дисперсию.

Для эксперимента были изготовлены 6 песчано-глинистых смесей с контролируемым гранулометрическим составом и объёмной влажностью. В качестве твердых компонент смесей были выбраны песок с размером зерен 0.16-0.63 мм и глина с размерами частиц менее 0.005 мм. Объёмные соотношения (в мл) сухих песка и глины были следующими: 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80. Объёмная

влажность принимала значения: 0, 10, 15, 20, 30, 35%. В качестве значения ДП при лабораторном методе измерения было взято среднее арифметическое в диапазоне частот 500-1000 Гц.

Оценка сходимости результатов полевого и лабораторного методов

В результате эксперимента выявлены следующие закономерности (рис.2):

1. Общий тренд изменения ДП по двум методам близок к линейному, по форме кривые подобны.

2. Наибольшие расхождения относятся к однородным смесям: чистому песку (6.4) и смеси на 80% состоящей из глины (6.3). При этом для чистого песка показания полевого метода превышают лабораторные, а для глинистой смеси — наоборот.

3. Минимальные расхождения (0.6) наблюдаются для сухих смесей.

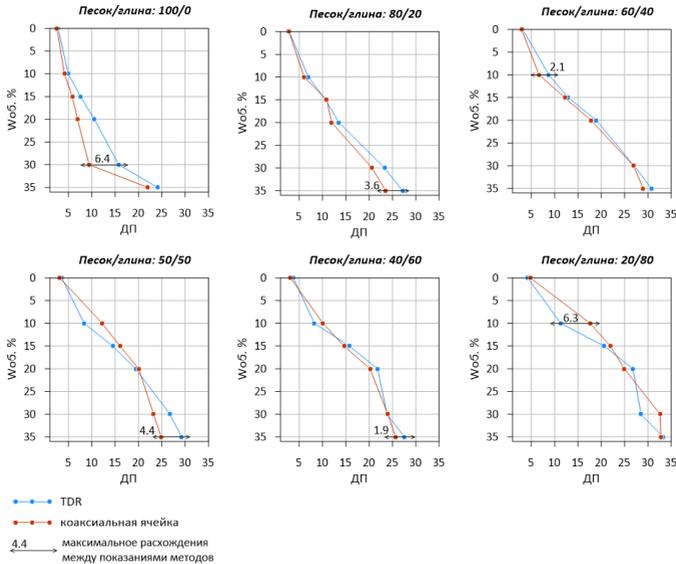


Рисунок 2. Графики зависимости, измеренной по двум методам ДП, от объемной влажности для песчано-глинистых смесей

Первая закономерность обусловлена объективной зависимостью ДП от содержания воды, не связанной с методом измерения. Вторую можно объяснить различным откликом смесей на уплотнение в коаксиальной ячейке. Глина, обладающая высокой связностью и пластичностью, при уплотнении образует образец с

высокой плотностью. Поскольку при этом из пор отжимается вода, измеренная в таких условиях ДП, оказывается завышенной относительно естественного состояния, фиксируемого полевым методом. Песок ведёт себя иначе: из-за высокой плотности кварцевых зёрен и отсутствия связности его уплотнение сводится к перераспределению частиц без существенного уменьшения общей пористости и отжатия воды, поэтому лабораторные значения ДП оказываются заниженными относительно полевого.

Незначительные расхождения между методами для сухих образцов обусловлены низким содержанием воды, и как следствие, отсутствием поляризации Максвелла–Вагнера, приводящей к высоким значениям ДП в области низких частот.

Таким образом, критичной является замена одного метода другим для однородных смесей (расхождение более 60 %), за исключением сухих или полностью водонасыщенных.

Изучение георадарного плато

Для проверки корректности работы коаксиальной ячейки и возможности осреднения ДП в частотном диапазоне 100 – 500 МГц (рабочий диапазон георадарных антенн) был проведён анализ дисперсионных кривых в полосе 30 МГц – 3 ГГц. Исследование выполнено на смесях с соотношением песок/глина 80/20 при различной влажности, а также для фиксированных значений влажности 35% и 0%. В данной работе показано, что в полосе частот от первых МГц до первых ГГц, известном как георадарное плато (Владов, Судакова, 2017), не наблюдается постоянного значения действительной части ДП.

Основываясь на полученных в данной работе измерениях, в качестве диапазона частот с минимальной дисперсией был выбран 500 МГц-3 ГГц (рис.3). Осреднение значений ДП в диапазоне частот 100-500 МГц некорректно.

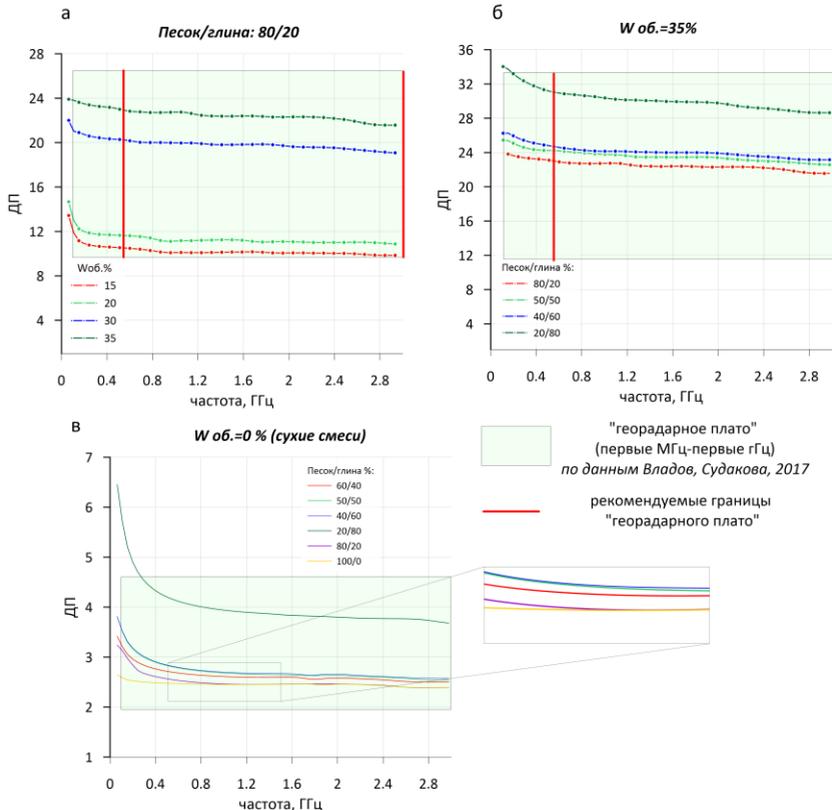


Рисунок 3. Дисперсионные кривые действительной части ДП для смесей: а) с соотношением песок/глина 80/20 для различной объемной влажности; б) фиксированной объемной влажности 35% для различных соотношений песка и глины; в) для сухих смесей

Глава 4. Методика интерпретации георадарных данных

В Главе 4 систематизирована методика интеграции петрофизических данных, измерений электромагнитных свойств и численного моделирования для выполнения однозначной геологической привязки георадарных отражений. Методика разделяется на 2 ветки в зависимости от типа независимой точки наблюдений: скважина или открытый грунт (шурф, траншея, карьер).

Последовательность применения методики представлена ниже.

1. **Качественный анализ и планирование.** Сопоставление полевой радарограммы с разрезом скважины/шурфа для выявления

несоответствий в количестве отражений и геологических, почвенных границ. Определение стратегии измерений, исходя из типа независимой точки наблюдения на объекте исследования.

2. **Петрофизические измерения.** Производится отбор образцов из скважины (шаг отбора по глубине равен вертикальному разрешению используемого георадара) для измерения весовой влажности и гранулометрического состава, а также электромагнитных свойств. Результатом измерения этих свойств являются колонки изменения гранулометрического состава, весовой влажности, ДП и проводимости от глубины.

В случае наличия на объекте исследования открытого грунта – измерение электромагнитных свойств производится полевым методом. Из этих же точек отбираются образцы для измерений петрофизических свойств. Итоговым результатом измерения электромагнитных свойств являются двумерные таблицы (карты) ДП и проводимости.

3. **Построение и анализ электрофизической модели.** Для случая «скважинных» данных формируется одномерная модель значений ДП и проводимости. Выполняется решение прямой задачи (лучевое моделирование) и сравнение синтетической и полевой трасс. Модель корректируется до совпадения по относительным амплитудам этих трасс. После этого модель перестраивается на всю длину георадарного профиля. Для случая данных, полученных в открытом грунте разработан оригинальный алгоритм построения двумерной электрофизической модели на основе статистического анализа. Алгоритм позволяет объединять в электрофизические слои статически однородную выборку измеренных значений диэлектрической проницаемости и проводимости, по определению коэффициент вариации для которой менее 30 %. Такой подход позволяет объективно выделить в разрезе электрофизические слои, не всегда совпадающие с литологическими, почвенными и т.д.

На этапах количественного сравнения синтетических и полевых данных используется введенный автором в работе параметр SSE (Sum of Squared Errors), количественно выражающего расхождение между модельной и полевой трассами:

$$SSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Tr_{i_{obs}} - Tr_{i_{im}})^2} \quad (4)$$

Здесь $Tr_{i_{obs}}$ – значения амплитуд на полевой трассе, $Tr_{i_{im}}$ – значения амплитуд на модельной трассе, N- число отсчетов

4. **Привязка георадарных отражений.** Выполняется расчет синтетической радарограммы с помощью полноволнового конечно-разностного моделирования в программе grMax по итоговой

электрофизической модели (см. этап 3). Производится привязка георадарных отражений на модельной, а затем на полевой радарограмме к границам на электрофизической модели. Путем количественного сравнения полевых и модельных данных принимается решение о принятии текущей электрофизической модели в качестве итоговой. В работе численным пределом параметра SSE, при котором дальнейшая корректировка электрофизической модели является избыточной, составляет 2.4 (установленный автором количественный критерий, обеспечивающий в данном исследовании необходимое сходство полевых и синтетических данных). Результатом этапа является скорректированная электрофизическая модель с размерами георадарного профиля, к границам которой однозначно привязаны все наблюдаемые на полевой радарограмме отражения.

5. Верификация и геологическая интерпретация. Задачей данного пункта методики является привязка границ электрофизической модели к измеренным в точке независимого наблюдения петрофизическим параметрам. Выполняется формулировка окончательной интерпретации в терминах геоморфологии, почвоведения или седиментологии.

Предложенный подход к интерпретации универсален для задач геоморфологии, почвоведения и геoarхеологии, так как опирается на стандартные для этих дисциплин параметры описания разреза (влажности и гранулометрического состава).

Глава 5. Результаты интерпретации георадарных данных в геологических приложениях

Решение задачи почвоведения

Постановка задачи: разделить по данным метода георадиолокации почвенные горизонты и оценить объемную влажность почвенного профиля до глубины 2 м. Точка независимого наблюдения: шурф длиной 2.2 м, глубиной 2 м. Почвенные горизонты были проведены специалистами почвоведом.

На первом этапе методики проводится качественная интерпретация: напрямую сопоставляются данные стенки шурфа с полевой радарограммой. В результате были обнаружены несоответствия по количеству осей синфазности и почвенных горизонтов.

Для измерений электромагнитных свойств был выбран полевой метод TDR. Измерения проводились в точках размеченной в стенке шурфа сетке с шагом 0.2 м по длине и 0.1 м по глубине. Из этих точек были отобраны образцы на измерения петрофизических параметров (этап 2).

На рисунке 4 показана итоговая электрофизическая модель, построенная по измерениям ДП и проводимости в стенке шурфа. Цветом выделены электрофизические слои, построенные по статистически однородной выборке измеренных значений (этап 3).

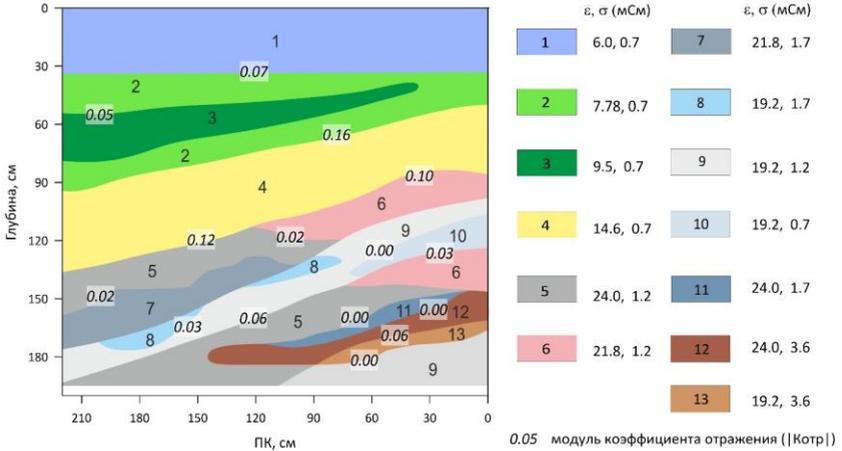


Рисунок 4. Итоговая электрофизическая модель с указанием электромагнитных свойств слоев

На основе итоговой модели (рис.5, а) была смоделирована синтетическая радарограмма (рис.5, б). Это позволило однозначно привязать оси синфазности отражённых волн на полевой радарограмме сначала к границам изменения электромагнитных свойств в модели, а затем к почвенным горизонтам, выделенным в натуре специалистами-почвоведомы (этапы 4,5) (рис.5, в; рис.6)

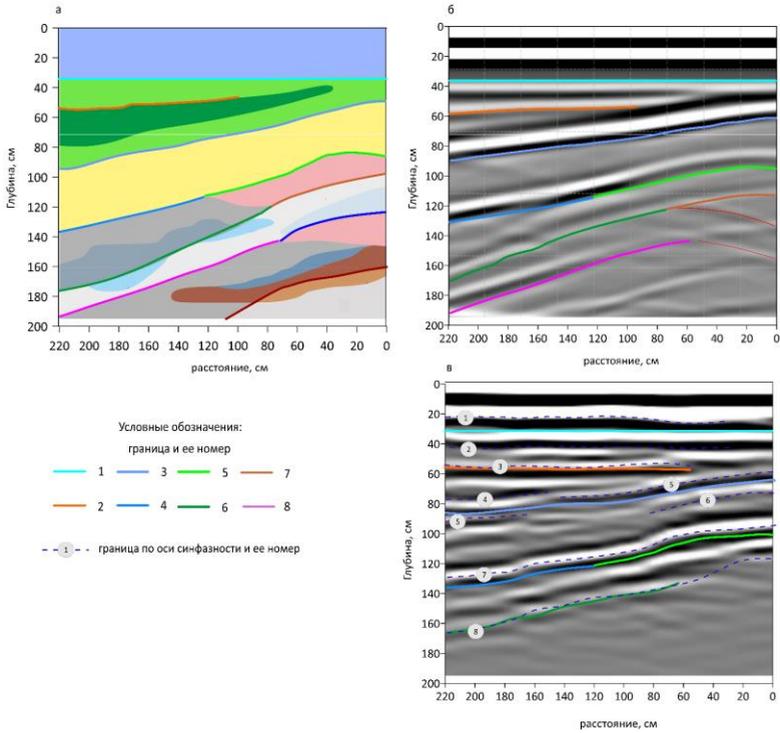


Рисунок 5. Приведение в соответствие границ на электрофизической модели (а) с границами, выделенными по осям синфазности на модельной (б) и полевой радарограммах (в)

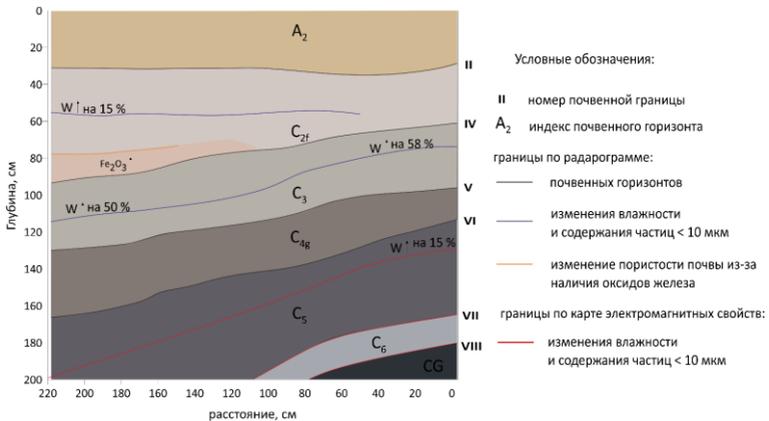


Рисунок 6. Итоговый результат интерпретации радарограммы

Помимо разделения на почвенные горизонты и их привязки к георадарным данным была решена задача по расчету объёмной влажности почвенного профиля. Для пересчета использовалась калибровочная кривая Топпа, так как измерения ДП выполнялось с помощью полевого метода TDR.

Апробация методики на данном объекте, где имелся максимальный объём дополнительных данных, позволила не только однозначно привязать оси синфазности к почвенным горизонтам (выделены чёрным на рис.6), но и к петрофизическим параметрам — изменению объёмной влажности на 50 – 58%. Кроме того, удалось интерпретировать локальные малоамплитудные оси синфазности, нестратиграфические отражения (выделены другим цветом на рис.6), как границы с незначительным изменением влажности (около 15%) и гранулометрического состава (содержания фракции <0.01 мм). Привязка была выполнена с максимальной погрешностью 7 см, что является допустимым в почвенных исследованиях.

Решение задачи геоархеологии и геоморфологии

Постановка задачи: провести вдоль линии георадарного профиля стратификацию толщи на погребенном склоне древней термокарстовой ложбины для дальнейшего обоснования выбора стоянки позднепалеолитического времени. Точка независимого наблюдения – скважина. Описание керна было выполнено специалистами геоморфологами. Разрез до 2 м полностью представлен песком разного цвета, встречается прослой супеси.

На первом этапе также проводится качественная интерпретация: сопоставляются скважинные данные с полевой радарограммой. В результате были обнаружены несоответствия по количеству осей синфазности и границ в скважине: разрез скважины представляет однородную песчаную толщу, в то время как на радарограмме несколько осей синфазности.

Для измерений электромагнитных свойств был выбран лабораторный метод. Образцы были отобраны из скважины с шагом 20 см (этап 2).

На рисунке 7 показана электрофизическая модель, построенная по результатам измерения ДП в скважине, до и после коррекции в ходе сопоставления полевой и модельной трасс (этап 3).

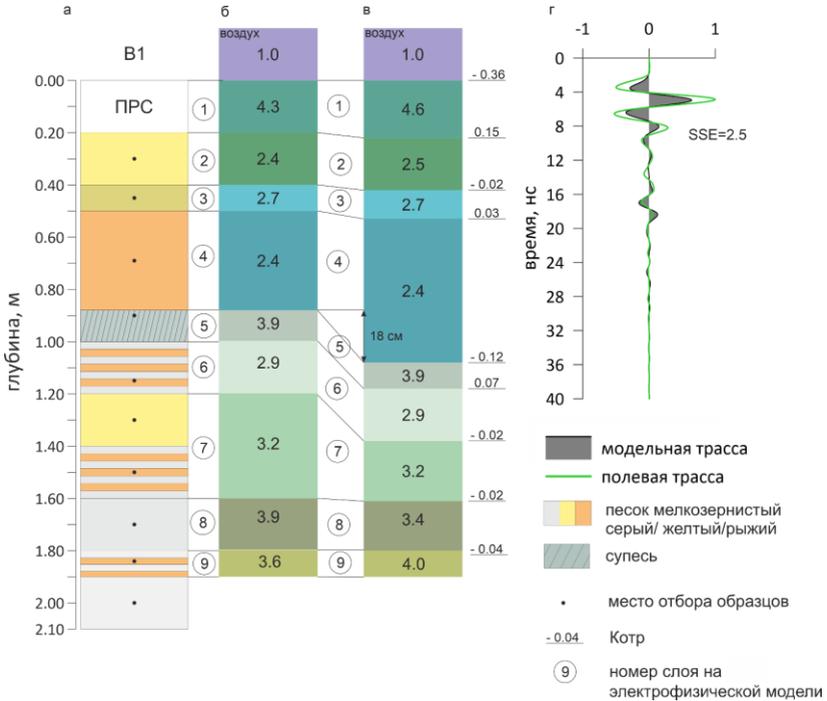


Рисунок 7. Построение и коррекция скважинной электрофизической модели а) литологическая колонка с указанием точек отбора образцов б) начальная скважинная модель в) модель после корректировки г) сопоставленные модельная и полевая трассы с указанием корня из суммы квадратов отклонений между ними (SSE)

Далее для того, чтобы расширить модель до размеров георадарного профиля, необходимо выполнить привязку осей синфазности на полевой радарограмме к границам электрофизической модели в месте положения скважины, используя модельную трассу (рис.8, а) (этап 3). В результате, проведя корреляцию привязанных осей синфазности по длине профиля, получается итоговая электрофизическая модель (рис.8, б, в). Данная модель подается на вход полноволнового моделирования, рассчитывается синтетическая радарограмма и по выбранным трассам оценивается параметр SSE. При достижении достаточного сходства модельных и полевых данных, электрофизическая модель принимается за итоговую и используется для дальнейшей привязки к границам в скважине или границам изменения петрофизических параметров (этап 4).

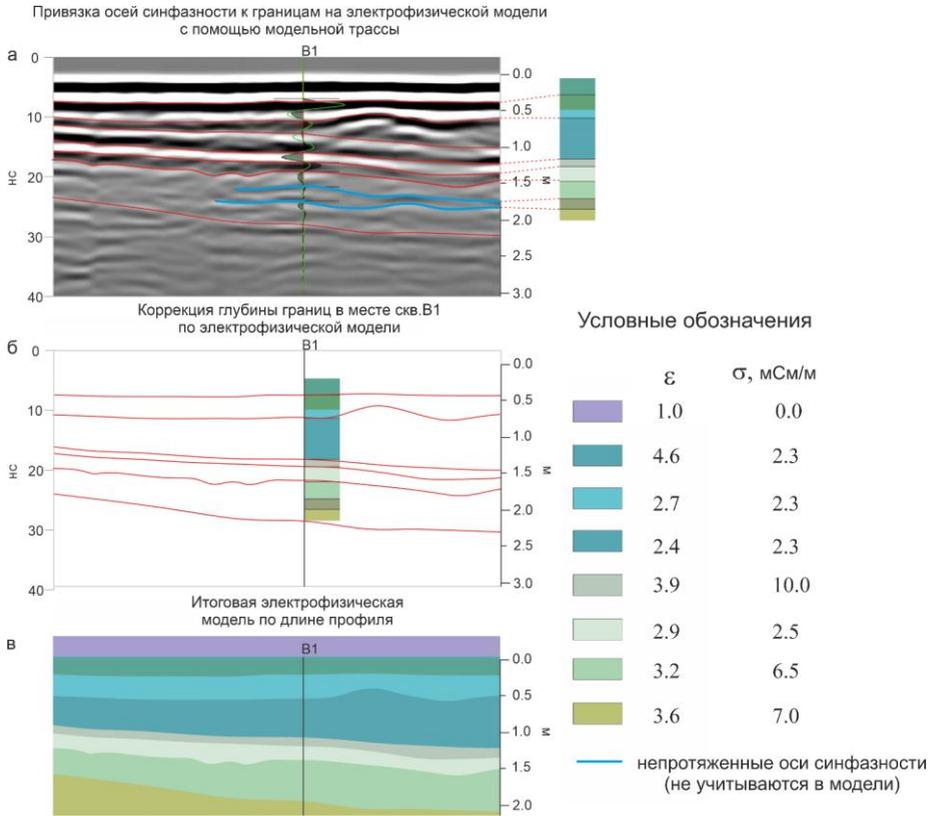


Рисунок 8. Процедура построения электрофизической модели по длине профиля а) Проведение границ по осям синфазности на полевой радарограмме, привязанным с помощью модельной трассы к границам модели б) Смещение проведенных по осям синфазности границ на глубины изменения электромагнитных свойств в модели в) Итоговая глубинная электрофизическая модель

На рисунке 9 представлен итоговый результат интерпретации, границы, выделенные по георадарным данным однозначно привязаны к скважинным данным. Нанесены были также границы с радарограммы, проведенные по нестратиграфическим отражениям, которые не могли быть привязаны к скважине, так как не были изначально зафиксированы в ней (выделены голубым цветом).

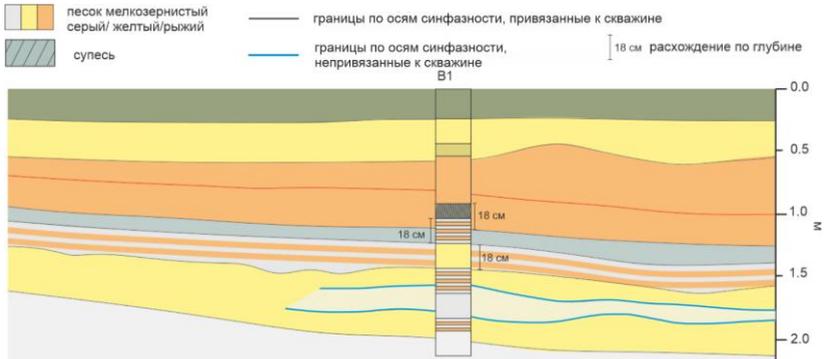


Рисунок 9. Результат интерпретации с максимальным отклонением от границ, выделенных по скважине 18 см

Использование данной методики позволило выполнить привязку осей синфазности к границам, выделенным только по цвету песка. По измеренным значениям ДП удалось в однородном песчаном разрезе идентифицировать границы даже со слабым изменением электромагнитных свойств, а моделирование подтвердило образование отражений на данных границах.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой проблемой межскважинной корреляции, выполняемой с помощью метода георадиолокации является несовпадение количества георадарных отражений с границами, зафиксированными в точках независимого наблюдения (скважины, шурфы). Причинами являются нестратиграфические отражения, интерференция, а также различия в способах классификации разреза у специалистов разного профиля (археологов, почвоведов и т. д). Для решения данной проблемы предлагается методика, основанная на измерениях электромагнитных свойств пород и численном моделировании. Этот подход позволяет объективно оценить возможность образования отраженной электромагнитной волны на каждой из идентифицированных границ и, как следствие, выполнить однозначную привязку георадарных отражений (**защищаемые положения № 2, 3**).

Одним из элементов методики является выбор метода измерения электромагнитных свойств. Оценка сходимости результатов полевого и лабораторного методов измерения необходима для обоснования их взаимозаменяемости, особенно при исследованиях на

разрезах, сложенных однородными песками или глинами, где наблюдаются максимальные расхождения в значениях ДП.

Важной частью методики интерпретации являются наличие базы данных со сведениями о ДП изучаемых отложений и способа построения калибровочных зависимостей, позволяющего выполнять корректный пересчет измеренных лабораторным методом значений ДП в любой петрофизический параметр (как правило, влажности) (**защищаемое положение №1**). Разработанные инструменты расширяют область применения методики, делая ее более универсальной.

Рекомендации по дальнейшей разработке темы

В дальнейшем предполагается расширение методики для уточнения интерпретации георадарных данных, полученных в иных средах: эстуарии, районы распространения многолетнемёрзлых пород. Рекомендуются также продолжать пополнять базу данных значениями ДП для других типов отложений с привязкой к различным физическим параметрам: температура, пористость, влажность.

Благодарности

Автор искренне благодарит своих научных руководителей кандидата геолого-минералогических наук Бричеву Светлану Сергеевну и доктора физико-математических наук, профессора Владова Михаила Львовича за всестороннюю поддержку и помощь в выполнении работы на протяжении многих лет.

Автор признателен сотрудникам кафедры сейсмологии и геоакустики, в особенности кандидату геолого-минералогических наук Старовойтову Анатолию Васильевичу, кандидату технических наук Пятиловой Анне Михайловне, кандидату физико-математических наук Судаковой Марии Сергеевне за ценные наставления по работе. Автор выражает благодарность коллегам-географам Шилову Павлу Михайловичу, Матасову Виктору Михайловичу, Шашериной Лидии Всеволодовне, Лобачевой Дарье Максимовне, а также сотрудникам учебно-научной станции «Лесуново»: Мироненко Ии Владимировне, Федину Антону Викторовичу, коллеге-геофизику Степченкову Владимиру Сергеевичу за помощь в сборе полевого материала. Хочется поблагодарить Юдину Анну Викторовну (Почвенный институт имени В.В. Докучаева) за предоставленное оборудование для гранулометрического анализа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. Bricheva S.S., Akhmetgaleeva N. B., Panin A. V., Shasherina L.V., **Tarasova M. A.**, Bezdudniy V.G., Matasov V.M., Zakharov A. L., Dobriansky A. S., Kurenkova E. I. Multi-scale palaeolandscape reconstruction at the Upper Paleolithic Byki sites, central East European Plain // *L'Anthropologie*. 2024. Vol. 128. №. 2. Pp. 103241. EDN: KAUFU. (2.67 п.л., вклад автора 25%). Импакт-фактор 0,419 (SJR).
2. Бричева С.С., Шилов П. М, Юрченко А.П., **Тарасова М.А.**, Матасов В.М. Опыт геофизической диагностики пространственно-временной изменчивости свойств городских почв // *Почвоведение*. 2025. № 6. С. 813-829. EDN: ATFURA. (1,96 п. л., вклад автора 30%). Импакт-фактор 2,20 (РИНЦ).
Bricheva S.S., Shilov P.M., Yurchenko A.P., Tarasova M.A., Matasov V.M. Experimental geophysical detection of spatial and temporal variability of urban soil properties // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58. No. 6. Pp. 1-15. EDN: PSGJNY. (1.86 п.л., вклад автора 20%). Импакт-фактор 1,864 (РИНЦ).
3. **Тарасова М.А.**, Бричева С.С., Владов М.Л. Контрасты электрофизических свойств в песчано-глинистом разрезе и их отражение на радарограмме // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2025. Т. 64. № 4. С.114 - 123. EDN: ERPUAE. (1.16 п. л., вклад автора 75%). Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ).
4. **Тарасова М.А.**, Бричева С.С., Владов М.Л. Методические особенности полевого и лабораторного методов измерения диэлектрической проницаемости на примере песчано-глинистых отложений // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2025. Т. 64. № 5. С.158-168. EDN: EWCWPU (1.28 п. л., вклад автора 80%). Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ).