

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Судакова М. С., Садуртдинов М. Р., Царев А. М., Скворцов А. Г., Малкова Г. В.

Аннотация

В статье рассматриваются возможности и ограничения метода георадиолокации для изучения торфяников и заболоченных участков в районе распространения многолетнемерзлых пород в летнее время. Теоретические и экспериментальные исследования доказывают необходимость расчета коэффициента поглощения электромагнитного сигнала при планировании георадиолокационных работ. Проведенные исследования с антенной 300 МГц показали, что при значении коэффициента поглощения, полученном для водонасыщенного торфа, отражения ниже кровли многолетнемерзлых пород невозможно получить, если глубина границы талоё/мёрзлое более 1,5 м. Применение методик георадиолокационного зондирования и профилирования позволяет детально расчлнить геокриологических разрез, определить глубину границ и физические свойства с заданной детальностью, тем самым сократив прямые наблюдения. Сделанные выводы подтверждены результатами прямых измерений.

Ключевые слова:

Георадар, динамические параметры, поглощение, объемная влажность.

**ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗАБОЛОЧЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ**

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

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

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический
факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, 119234, Москва, Ленинские горы, 1,
Россия; m.s.sudakova@yandex.ru*

В статье рассматриваются возможности и ограничения метода георадиолокации для изучения торфяников и заболоченных участков в районе распространения многолетнемерзлых пород в летнее время. Теоретические и экспериментальные исследования доказывают необходимость расчета коэффициента поглощения электромагнитного сигнала при планировании георадиолокационных работ. Проведенные исследования с антенной 300 МГц показали, что при значении коэффициента поглощения, полученном для водонасыщенного торфа, отражения ниже кровли многолетнемерзлых пород невозможно получить, если глубина границы талоё/мёрзлое более 1,5 м. Применение методик георадиолокационного зондирования и профилирования позволяет детально расчленить геокриологических разрез, определить глубину границ и физические свойства с заданной детальностью, тем самым сократив прямые наблюдения. Сделанные выводы подтверждены результатами прямых измерений.

Георадар, динамические параметры, поглощение, объемная влажность.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение углеродных залежей (торфа) в болотных и лесных экосистемах – одна из важнейших геоэкологических задач в Арктике. Арктические экосистемы это огромный запас глобального углерода, который гарантирует стабильность климата в планетарном масштабе [Восстановление..., 2017]. С одной стороны, торф является «теплоизолятором», препятствующим деградации мерзлых пород и изменению глубины залегания их кровли, с другой – это потенциальный источник энергии.

Торф является одним из наиболее перспективных региональных источников топлива. В последнее время наблюдается большой интерес к использованию местных видов энергетических ресурсов, стремление к энергетической независимости регионов от привозных и, как правило, дорогостоящих видов топлива [Малыгин, Любов, 2014; Тимофеева, Мингалеева, 2014; Энергетическая ..., 2009]. Западная Сибирь – крупнейший в мире торфяной бассейн. В отдельных районах мощность торфа достигает 8-10 метров [Васильчук, Васильчук, 2016; Фотиев, 2017].

Торфяные залежи легковоспламенимы в засушливую, жаркую погоду и его крайне тяжело потушить. При горении торфа выделяется большое количество углекислого газа, что негативно сказывается на экологии. Во избежание экологических катастроф необходимо исследовать и контролировать зависимости между растительным покровом, его структурой, заболоченными экосистемами и торфяными болотами различной мощности и генезиса.

Основными задачами исследования заболоченных территорий, находящихся в зоне распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), являются определение положения подошвы торфяной залежи (минерального дна) и кровли ММП в пространстве. Каждая из этих задач успешно решается с помощью георадиолокации. Георадиолокация – косвенный метод исследования геологической среды с помощью искусственного высокочастотного (10 МГц-3 ГГц) электромагнитного сигнала. Задачи, которые решает георадиолокация, можно разделить на три группы: 1) задачи обнаружения: искомых аномалий, границ, локальных объектов 2) задачи определения положения в пространстве: глубины залегания границ, размеров объектов, аномальных зон и 3) определение физических свойств (электромагнитных или механических) на качественном или количественном уровне. Очевидно, что решение второй задачи невозможно без решения первой, а третьей без решения первой и второй.

Кровля ММП уверенно картируется по георадарным данным за исключением случая, когда талый слой представлен глинистыми или засоленными грунтами [Ермаков, Омеляненко, 2001 и др.; Старовойтов, 2010; Садуртдинов и др., 2016; Судакова и др., 2017; Brosten et.al., 2009; Shean, Marchant, 2010]; определение подошвы торфа также не вызывает затруднений [Plado et.al., 2001; Rosa et. al., 2009]. Обе эти границы являются «сильными рефлекторами», поэтому отражения от них отчётливо выделяются на фоне помех на георадарных данных. Несмотря на это, авторы столкнулись с невозможностью получения отражения от подошвы торфа в случае, если она находится ниже кровли мерзлых пород, иными словами – с невозможностью решить первую задачу георадиолокации – обнаружение (!). Приведённые в литературе данные [например,

Sjöberg et al., 2015], содержат успешные результаты георадиолокации только для случаев, когда минеральное дно находится выше кровли ММП по разрезу. Авторам представляется принципиально важным рассмотреть вопрос уменьшения амплитуды электромагнитного сигнала в торфяном разрезе в криолитозоне и выявить закономерность, определяющую наличие или отсутствие на радарограмме отражения от минерального дна ниже кровли мерзлых пород.

Вторая задача георадиолокации – определение глубины искомым границ и объектов – традиционно решается с помощью «привязки» к скважинам, определению скорости по гиперболам дифракции или по априорным данным [Владов, Судакова, 2017; Старовойтов, 2008]. В этом случае одно значение средней скорости используется для всего участка работ или профиля, длина которого нередко достигает сотни метров или даже первые километры. Однако, скорость электромагнитных волн может значительно меняться в условиях однотипного разреза на небольших расстояниях. В частности, авторы столкнулись с изменением скорости с 3,5 до 7 см/нс в пределах 100 м [Судакова и др., 2017]. Чтобы избежать ошибки в определении глубины границ, для определения скорости возможно использовать измерения с разнесёнными источником и приёмником (методика зондирования), которые позволяют определять скорость электромагнитных волн с заданной детальностью.

Скорость внутри слоя, представленного однотипными отложениями, входящими в состав одной фации или комплекса, может быть пересчитана во влажность с использованием известных корреляционных зависимостей [Near-Surface..., 2005], тем самым будет решена третья задача георадиолокации – определение физических свойств. Обычно контроль влажности в приповерхностном слое производится с помощью прямых измерений – термостатно-весовым способом. Для этих целей делаются закопушки, из которых отбираются образцы небольшого размера [Павлов, Малкова, 2009]. Значение влажности образца присваивается сезонно-талому слою от поверхности на всю глубину. Очевидно, что в самом способе уже содержатся ошибки, так как измеренное в отдельной точке значение присваивается большому объёму грунта или почвы. С возрастанием мощности слоя должна увеличиваться и погрешность в определении влажности таким способом. Кроме того данный метод требует больших затрат времени и труда. Диэлектрическая проницаемость зависит от содержания воды в среде, и временные и латеральные изменения влажности почвы можно контролировать с помощью георадара.

Данная статья посвящена применению георадиолокации при исследовании заболоченных экосистем и торфяных болот различного генезиса с различной мощностью

торфяной залежи в районе верховьев реки Печора Заполярного района Ненецкого автономного округа.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые исследования проводились на участках ландшафтов разных типов. Схема профилей на космическом снимке представлена на рис. 1. Разрезы исследуемых участков представлены торфом, песком, супесью различной мощности в мёрзлом и талом состояниях. Комплекс исследований включал в себя георадиолокацию, бурение скважин с отбором керна, измерение мощности активного слоя с помощью шупа. Прямые измерения проводились на всех профилях.

Георадиолокационные исследования выполнялись с использованием георадара «Zond-12e» и антенн с центральной частотой 150 МГц и 300 МГц (RadarSystems, Inc., Рига, Латвия) (рис. 2, а). Для получения данных использовался метод непрерывного профилирования. Шаг дискретизации, количество накоплений, время записи выбирались исходя из задачи и геокриологических условий. Запись велась в непрерывном режиме, расстояние между точками измерений (трассами) составляло от 2 до 5 см. Геометрическая привязка профиля осуществлялась с помощью GPS навигатора по опорным точкам и рулетки через каждые 10-25 метров.

Для определения скоростных характеристик грунтов, представленных в разрезе, на отдельных характерных точках профилей выполнены наблюдения по методике зондирования: одна антенна находилась неподвижно на пикете, а вторая перемещалась вдоль профиля. Запись также велась в непрерывном режиме, расстояние между трассами составило 2-5 см.

Обработка данных проводилась в программах Radexplorer и RadexPro (ООО «Деко-геофизика СК», Москва, РФ) и состояла из масштабирования георадарограмм по маркерам, корректировки начала записи (введение статической поправки), полосовой фильтрация (фильтр Ормсби) в полосе, соответствующей полезному сигналу, амплитудной коррекции за сферическое расхождение, определения скоростей электромагнитных волн.

Для верификации геологической природы и глубины границ, полученных по результатам георадиолокационной съёмки, на участках исследований были пробурены скважины. Бурение скважин проводилось колонковым способом с помощью ручного мотобура (рис. 2, б). Глубина скважин зависела от положения искомым границ и выбиралась таким образом, чтобы скважина вскрыла подошву торфа и кровлю ММП.

УМЕНЬШЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ТОРФЯНОМ РАЗРЕЗЕ

Динамический диапазон стандартных георадаров не превышает динамического диапазона встроенного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Для 16-ти разрядного АЦП соотношение максимального и минимального сигналов составляют порядка 90 ДБ, однако при соотношении максимального сигнала и аппаратурных шумов порядка 5 000 динамический диапазон снижается до 70 ДБ. В наших исследованиях относительная амплитуда сигнала прямого прохождения составляла около 10^4 , а амплитуда шума не превышала 10, то есть динамический диапазон полученных георадарных записей находился в пределах от 60 до 80 ДБ. Для определения возможности выделения глубоких отражений на георадарных данных было принято значение динамического диапазона 70 ДБ, характерного для стандартных георадаров [Ground penetrating radar..., 2009]: при прохождении через рассматриваемую среду и отражении от искоемых границ, уменьшение амплитуды не должно превышать 70 ДБ.

Для определения возможности выделения отражений ниже «сильного рефлектора» – кровли мёрзлых пород – на георадиолокационных данных необходимо провести некоторые расчёты с использованием принятых в георадиолокации допущений.

С точки зрения классической теории, в случае однородно слоистой среды, амплитуда сигнала A_h , отражённого от границы на глубине h , будет равна:

$$A_h = A_0 K_{отр} \prod_{i=1}^n (1 - K_{i_{отр}}^2) \cdot e^{-2h \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{2h}, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда исходного (зондирующего) сигнала, $K_{отр}$ – коэффициент отражения на глубине h , $\prod_{i=1}^n (1 - K_{i_{отр}}^2)$ – произведение коэффициентов прохождения промежуточных границ до границы и обратно, $e^{-2h \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{2h}$ – затухание и геометрическое расхождение сферической волны.

Рассмотрим две простые модели слоистых сред, описывающие водонасыщенный торфяной разрез в зоне распространения ММП (рис. 3). Модель 1: кровля ММП расположена ниже минерального дна и модель 2: граница талое/мёрзлое проходит выше. Для расчёта коэффициентов отражения $K_{отр}$ от границ воспользуемся формулой:

$$K_{отр} = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}. \quad (2)$$

Средние скорости на участке исследований в талых водонасыщенных торфе и песке равны $V_m = 4,5$ см/нс и $V_n = 7$ см/нс соответственно. Скорости в мёрзлых грунтах подбирались по литературным данным [Мачарет, 2006; Старовойтов, 2009; Argone et. al., 1998]: для мёрзлых грунтов характерны скорости порядка 15 см/нс, для льда – 17 см/нс.

Так как торф характеризуется большой льдистостью, то скорость в нём должна асимптотически приближаться к скорости во льду. Для расчётов скорости в мёрзлом песке и торфе были взяты равными $V_{mn} = 15$ см/нс и $V_{mm} = 17$ см/нс.

Поглощение α определялось двумя способами. Первый способ – по амплитудам отражённых от кровли мерзлых пород волн на разных глубинах, второй – по кратным волнам. Для анализа были использованы только амплитуды сигналов, отражённых от кровли мерзлых пород, полученных на участках с одинаковой литологией: один участок, сложенный песками, и три участка, сложенные торфом. Анализировались отражённый и кратный сигналы без интерференции с сигналом прямого прохождения или с отражением от минерального дна или других литологических границ. На рис. 4 показаны фрагменты георадарограмм с осью синфазности отражения от кровли ММП на участке распространения торфяников. Зелёной рамкой показан участок с осью синфазности, который использовался для анализа амплитуд, красный рамкой – непригодный для анализа амплитуд из-за интерференции с сигналом прямого прохождения. На рис. 4, б приведён фрагмент георадарограммы с отчётливо видной кратной волной от кровли ММП.

Описанные ниже подходы к решению обратной задачи – определению поглощения – не учитывают горизонтальный и вертикальный градиент электромагнитных свойств, зависимость поглощения от частоты, условий приёма и возбуждения, возможную интерференцию на промежуточных границах и пр., поэтому используя такой способ можно только оценить средний коэффициент поглощения, заранее предполагая большую погрешность. Георадарограммы, использованные для анализа, получены с антенной с центральной частотой 300 МГц в воздухе.

Определение поглощения по амплитудам волн, отражённых от границ на разных глубинах.

Рассмотрим случай границы кровли ММП. При условии постоянства электромагнитных свойств по обе стороны от границы формула (1) отражает зависимость амплитуды отражённой волны только от глубины и поглощения:

$$A_h = const \cdot e^{-2h \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{2h}. \quad (3)$$

График зависимости амплитуды волны, скорректированной за сферическое расхождение, от двойной глубины отражающей границы должен иметь вид экспоненциальной зависимости. То есть уравнение

$$A_h \cdot 2h = const \cdot e^{-2h \cdot \alpha} \quad (4)$$

аналогично $y(x) = const \cdot e^{-x \cdot \alpha}$, где коэффициент при x – коэффициент поглощения.

На рис. 5 приведены графики зависимости максимальной амплитуды отражения от кровли ММП, скомпенсированной за сферическое расхождение, от глубины границы, для случаев, когда активный слой сложен песком или торфом. На графики вынесены уравнения экспоненциальной регрессии. В случае песка значения коэффициента поглощения α равно 0,42, в случае торфа – 0,66.

Определение поглощения по амплитудам кратных волн.

Пример применения такой оценки изменения амплитуды показан в [Судакова, Владов, 2009]. Принцип расчёта следующий: однократное отражение приходит, один раз отразившись от границы. Кратное отражение проходит путь однократного сигнала, претерпевает отражение от дневной поверхности, затем второй раз проходит путь отражённого сигнала, второй раз отражаясь от границы в глубине. Соответственно, амплитуда кратного отражения A_{2h} будет равна:

$$A_{2h} = A_0 K_{\text{возд}} K_{\text{отр}}^2 \cdot e^{-4h \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{4h} \quad (5)$$

где $K_{\text{возд}}$ – коэффициент отражения от дневной поверхности.

Отсюда:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{A_h K_{\text{возд}} K_{\text{отр}} \frac{1}{2}}{A_{2h}}\right)}{2h} \quad (6)$$

Для расчёта α по амплитудам кратных волн использовались фрагменты георадарограмм с уверенно выделяемыми осями синфазности однократно отражённой и кратной волн, не интерферирующие с какими-либо другими сигналами (рис. 4, б, рис. 8, в, участок 70-110 м от начала профиля). Среднее значение коэффициента поглощения составило 0,8, минимальное – 0,27, максимальное – 1,62.

Расчёт полного затухания сигнала при прохождении или отражении от кровли ММП.

Рассмотрим уменьшение амплитуды отражения для случаев моделей, приведённых на рис. 3. В случае модели 1 волна проходит границу минерального дна и отражается от кровли ММП, в случае модели 2 рассматривается волна, прошедшая кровлю ММП и отразившаяся от границы мёрзлый торф/мёрзлый песок.

Пусть амплитуда сигнала на расстоянии 10 см от источника равна 1, тогда, с учётом геометрического расхождения сферической волны, на расстоянии 100 см она уменьшится в 10 раз и будет равна 0,1 без учёта поглощения и отражений на границах. Коэффициенты отражения и прохождения рассчитывались в соответствии со значениями скоростей, приведённых на рис. 3. Амплитуда отраженного сигнала рассчитывалась по формуле (1). Затухание сигнала \bar{A} рассчитывалось по формуле:

$$\bar{A} \left(\frac{\text{ДБ}}{\text{м}} \right) = 20 \lg \frac{A_0}{A_h} , \quad (7)$$

где $A_0 = 1$ – амплитуда зондирующего сигнала (на глубине 10 см).

На рис. 6 приведены графики зависимости затухания сигнала от глубины для моделей на рис. 3 без учёта поглощения ($\alpha=0$) (а) и с учётом поглощения (б).

Для расчёта затухания сигнала в водонасыщенном торфе принималось среднее значение поглощения из полученных двумя способами значений, равное 0,7. В случае модели 1 талая часть разреза сложена водонасыщенными торфом и песком, поэтому коэффициент поглощения в ней изменяется от 0,4 (разрез полностью сложен песком) до 0,7 (разрез полностью сложен торфом). В случае модели 2 коэффициент поглощения в мёрзлой толще принимался равным 0.

Максимальная глубина проникновения георадарного сигнала (уровень 70 ДБ) значительно отличается для сред без поглощения (рис. 6, а) и с поглощением (рис. 6, б): без учёта поглощения, максимальная глубина превышает 10 метров, даже в случае, когда кровля ММП находится выше по разрезу, чем минеральное дно.

С учётом поглощения (рис. 6. б), в случае, если кровля ММП в торфяном разрезе находится выше минерального дна, максимальная глубина проникновения сигнала (отметка 70 ДБ) равна 1,5 м, и на радарограмме не представляется возможным выделение отражённых сигналов ниже этой глубины. В случае модели 1, максимальная глубина проникновения сигнала в 2-3 раза больше: 3-4,5 м.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ГРАНИЦЫ И СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МЕТОДОМ ЗОНДИРОВАНИЯ

Результаты георадиолокационной съёмки по методике зондирования на участке профиля 9 приведены на рис. 7. На этом участке профиля существенно изменяется структура разреза, которая подтверждена данными бурения. На георадарограммах выделяются две отраженные волны: от подошвы торфа (показана коричневым цветом) и от кровли ММП (показана синим цветом). Эти отражающие границы прослеживаются на временном разрезе непрерывного профилирования. По результатам зондирования на пикете 51, скорость распространения электромагнитных волн до этих границ равна 4,3 и 5,1 см/нс, глубина их залегания 105 и 220 см соответственно. По данным бурения глубина этих границ равна 110 см и 210 см. Таким образом, по методике зондирования возможно определить с высокой точностью скорость электромагнитных волн в разрезе и глубину до интересующих границ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПО ГЕОРАДАРНЫМ ДАННЫМ

На георадиолокационном профиле 7, длиной 150 м, было сделано 3 георадиолокационных зондирования, пробурена скважина и сделаны замеры глубины протаивания щупом в восьми различных точках (рис. 8). Георадарограмма по профилю приведена на рис. 8 а. (синим показано отражение от кровли ММП). Глубина минерального дна на профиле по данным бурения порядка двух метров и на георадарограмме отражение от подошвы торфа не выделяется.

На основании данных прямых измерений и результатов георадиолокационных зондирований была определена скорость распространения электромагнитных волн в СТС (рис. 8, б). Две точки зондирования находятся в непосредственной близости от точек измерения мощности талого слоя прямыми методами. Значения глубины кровли ММП по данным георадиолокационного зондирования и измеренные щупом практически совпадают. Значения скорости, полученные по зондированию и с помощью деления известного значения мощности СТС на время прихода отражённой волны на георадарограмме, полученной с совмещёнными источником и приёмником, различаются в пределах 5 %.

Рассчитанные и измеренные значения скорости были проинтерполированы между точками и проэкстраполированы на концах профиля линейным способом. С использованием этого скоростного закона был построен глубинный разрез (рис. 8, в). Скорости в сезонно-талом слое меняются от 3,4 до 5,5 см/нс. Из скорости была рассчитана диэлектрическая проницаемость и по формуле Топпа [Торр et al., 1980] была рассчитана объёмная влажность в активном слое (рис. 8 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, в).

На пикетах 70-110 м объёмная влажность увеличивается в 1,5-2 раза. Косвенным признаком увеличения влажности также является появление на временном разрезе кратных волн от кровли ММП.

Полученные результаты показывают, что при необходимости прямые измерения влажности и мощности СТС щупом могут быть заменены (или существенно сокращены) на георадиолокационные измерения без потери точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты и анализ полевых материалов показал необходимость количественного анализа коэффициента поглощения электромагнитного сигнала при планировании методики георадиолокационных работ. Проведенные исследования с антенной 300 МГц показали, что при значении поглощения 0,4, полученном для водонасыщенного песка, возможно выделить отражение от границ ниже кровли ММП при

её глубине от 0 до 4-5 м. При значении поглощения 0,7, полученном для водонасыщенного торфа, отражения ниже кровли ММП невозможно получить, если глубина границы талоё/мёрзлое более 1,5 м. Данный факт ограничивает глубинность георадиолокации при определении объёма торфа в криолитозоне. Возможно, решение проблемы лежит в проведении работ в зимнее время при полностью промерзшем активном слое.

Глубина границ, определённая по данным георадиолокационного зондирования, подтверждена данными прямых измерений. Использование методики зондирования позволяет определять скорости электромагнитных волн в разрезе с заданной детальностью, тем самым удаётся избежать ошибок в определении скорости, а значит, и глубины положения искомым границ и объектов. На основе информации об изменении скоростей возможно детальное расчленение разреза на литологические разности, расчёт объёмной влажности по имеющимся в литературе корреляционным зависимостям. Использование комплекса методик георадиолокации позволяет существенно сократить трудоемкие прямые методы изучения особенностей залегания и свойств талых и мерзлых пород.

Работа выполнена по госзаданию, согласно Плану НИР ТюмНЦ СО РАН на 2018-2020 годы, протокол №2 от 8.12.2017. (Приоритетное направление IX.135. Программа IX.135.2 Проект: IX.135.2.2. Изменения в литосфере и ландшафтах криолитозоны России под влиянием климатических и техногенных факторов: глобальные, региональные и локальные составляющие пространственно-временной изменчивости).

Экспедиционные работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 16-17-00102.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли, 2016, т. XX, №4, с. 3-15.
2. Владов М. Л. Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. «Геос», Москва, 240 с.
3. Восстановление нарушенных земель на экосистемных принципах: методическое пособие (под редакцией А.В.Кончица, Т.Ю. Минаевой). Нарьян-Мар, 2017, 92 с
4. Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. Изд-во Моск. ун-та, 2010, №6, с. 91-97.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников, 2006, Научный мир, Москва, 392 с.
6. Омеляненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород. Дисс. доктора.техн. наук, Якутск, 2001, 359 с.

7. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли т. XIII, №4, 2009, с. 32-39
8. Малыгин П.В., Любов В.К. Исследование структуры, состава и свойств торфа // Вестник Череповецкого государственного университета, 2014, № 5, сс12-18.
9. Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М. Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геокриологических и геофизических исследований // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т. 1. Часть 4. Геофизические исследования в криолитозоне при строительстве. М, «Университетская книга», 2016, с. 340-345.
10. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М, МГУ, 2008, 191 с.
11. Судакова М.С., Владов М.Л. Диэлектрические измерения в лабораторных условиях с использованием георадара, Геофизика, №3, 2009, с.10-19
12. Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г., Царев А.М. Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях, Криосфера Земли, том 21, № 3, с.69-82.
13. Тимофеева С.С. Мингалеева Г.Р. Перспективы использования торфа в региональной энергетике. // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014, Т. 325, № 447, сс. 46–55.
14. Фотиев С.М. Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири // Криосфера Земли, Т. XXI, №5, с. 3-15.
15. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утвержден распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715_р, 144 с.
16. Arcone, S. A., Lawson, D. E., Delaney, A. J., Strasser, J. C., Strasser, J. D., Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost, Geophysics, 1998, N. 63, pp. 573–1584
17. Brosten T. R., Bradford J. H., McNamara J. P., Gooseff M. N., Zarnetske J. P., Bowden W. B., Johnston M. E. Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using ground-penetrating radar // Journal of Hydrology 373, 2009, p. 479–486/
18. Ground penetrating radar theory and applications / Edited by Harry M. Jol, Elsevier, 2009, 523p.
19. Near-Surface Geophysics // ed.D. K.Butler, Society of exploration geophysycs, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 2005.
20. Plado J., Sibul I., Mustasaar M., Jõelett A. Ground-penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia. Estonian Journal of Earth Sciences, 2011, Vol. 60, N. 1, pp. 31-42
21. Rosa, E., M. Larocque, S. Pellerin, S. Gagne, and B. Fournier.. Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar. Earth Surf. Processes Landforms, 2009, N. 34, pp. 377–383
22. Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S. W. Geophysical mapping of peatland permafrost, The Cryosphere, N.9, 2015, pp. 465–478
23. Shean D. E., Marchant D. R. Seismic and GPR surveys of Mullins Glacier, McMurdo Dry Valleys, Antarctica: ice thickness, internal structure and implications for surface ridge formation // Journal of Glaciology, 2010. Vol. 56, No. 195, p.48-64.
24. Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // Water Resource Research, Vol. 16, 1980, p.574-582.

Рис. 1. Схема сети комплексных геологических исследований, выполненных на участке Нарьян-мар-Шапкина.

Рис. 2. Георадиолокационное профилирование (а) и бурение скважины (б) на участке исследований

Рис. 3. Модели торфяного разреза. Модель 1: кровля ММП расположена ниже минерального дна, модель 2: кровля ММП проходит выше минерального дна.

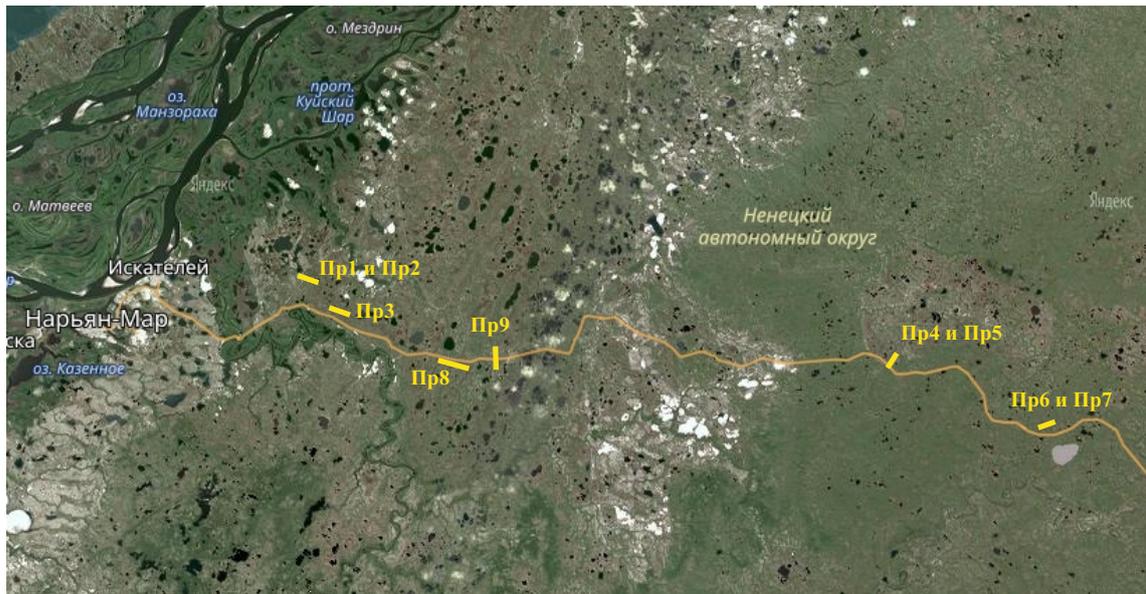
Рис. 4. Фрагменты георадарограмм по профилям, пройденным на участках распространения торфов. Синей линией показана ось синфазности отражения от кровли ММП, фиолетовой – кратная волна от кровли ММП. Красной рамкой показана часть оси синфазности с интерференцией с сигналом прямого прохождения, зеленой рамкой – часть оси синфазности без интерференции, которая использовалась для анализа амплитуд.

Рис. 5. Зависимость максимальной амплитуды отражения от кровли ММП, скомпенсированной за сферическое расхождение, от глубины границы. На графики вынесены уравнения экспоненциальной регрессии.

Рис. 6. Рассчитанное затухание отражённого электромагнитного сигнала для случая моделей на Рис. при положении кровли ММП на разных глубинах: а – без учёта поглощения, б – с учётом поглощения. Красной чертой показан уровень динамического диапазона георадарограммы.

Рис. 7. Сопоставление результатов зондирования (а) и непрерывного профилирования (б). Отметки расстояния на данных зондирования соответствуют отметкам расстояния на данных профилирования.

Рис. 8. Результаты георадиолокационной съёмки по профилю 7: а) георадарограмма после обработки. Отражение от кровли ММП показано синим; б) скорость распространения электромагнитных волн в активном слое на профиле 7; в) геологический разрез со значениями объёмной влажности в активном слое ($W_{об}$).



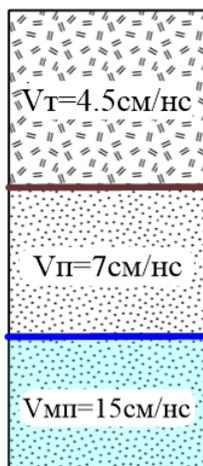
a)



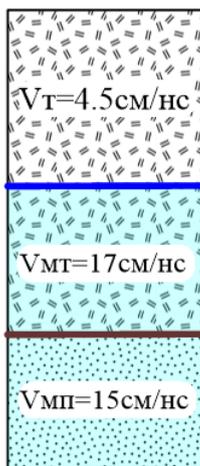
б)

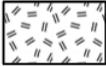
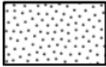
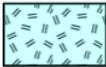


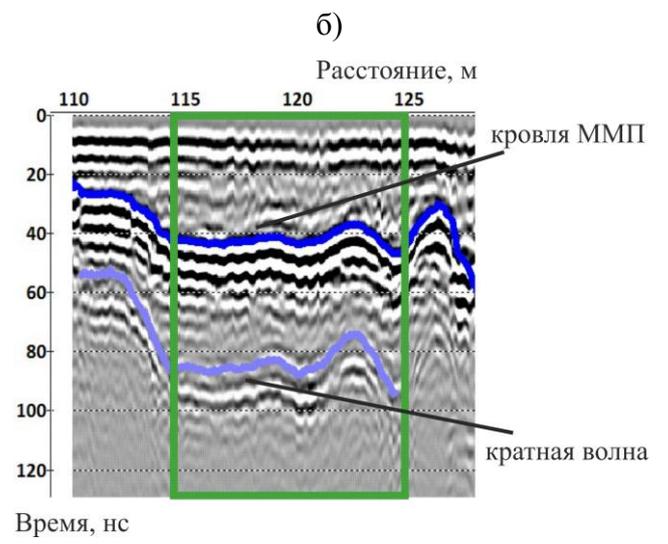
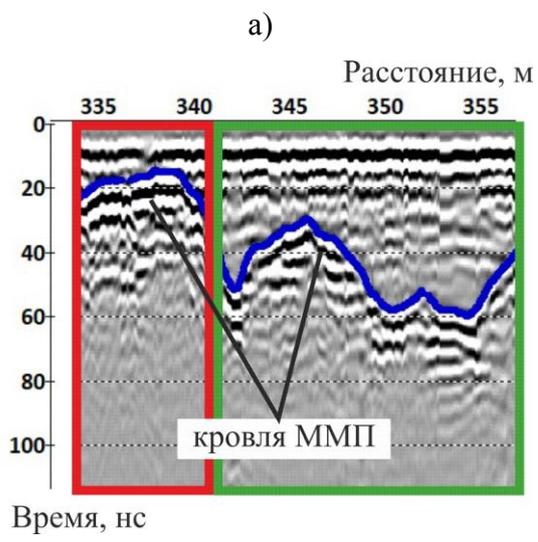
Модель 1

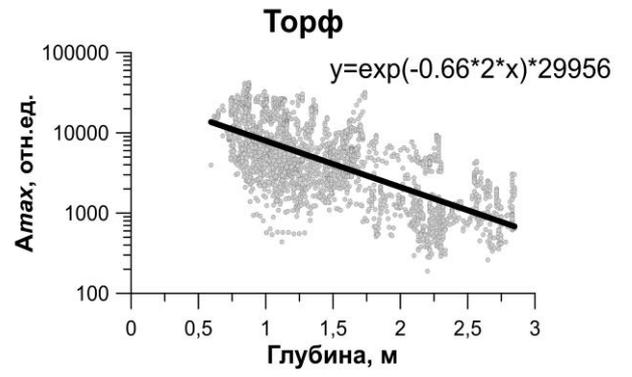
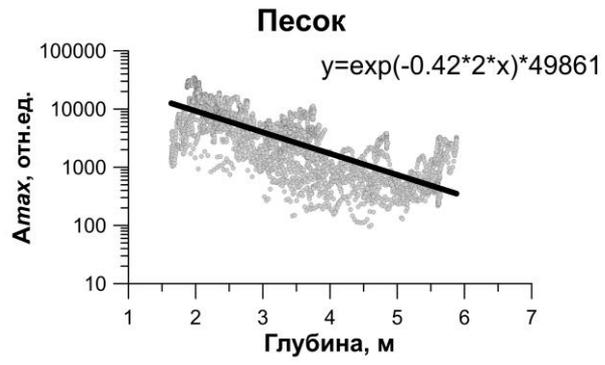


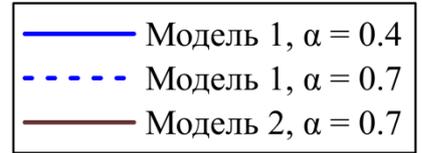
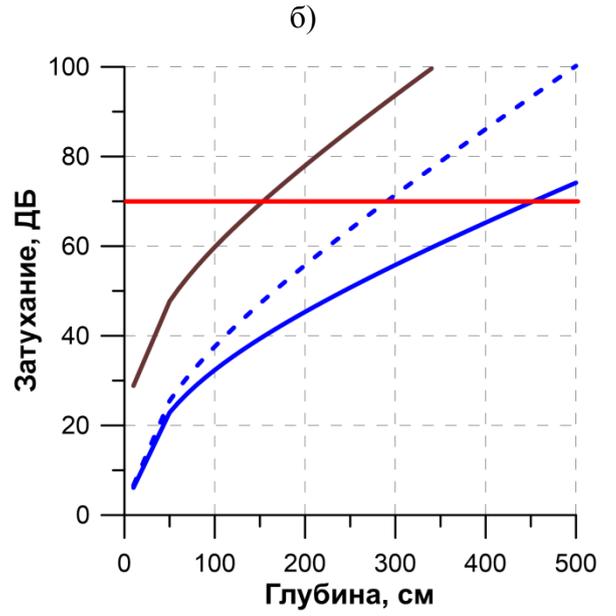
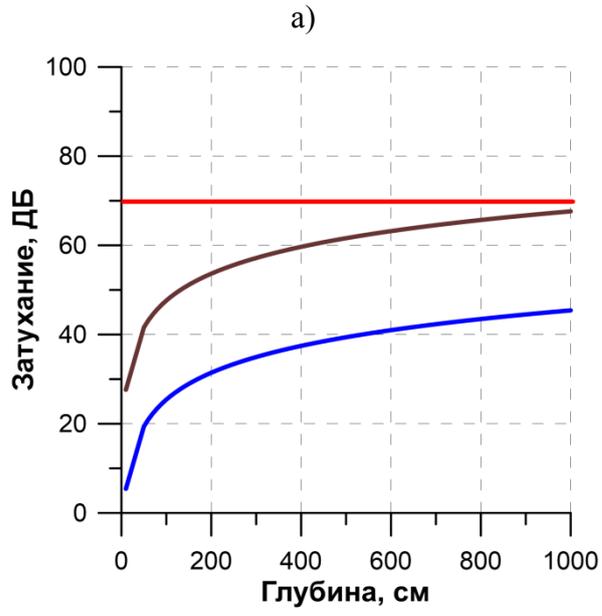
Модель 2



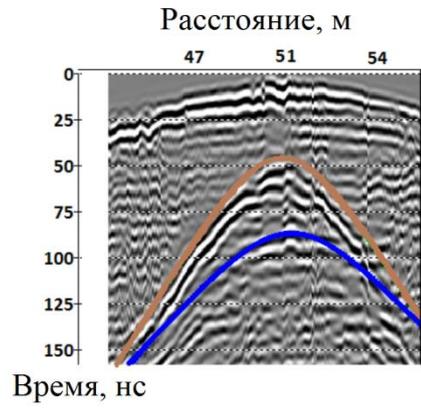
-  торф
-  песок
-  мёрзлый торф
-  мёрзлый песок
-  кровля ММП
-  минеральное дно



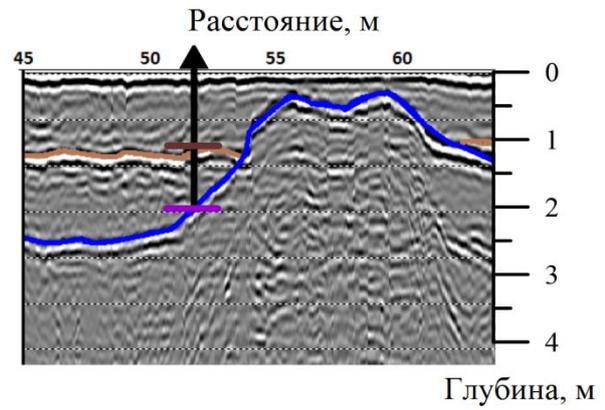




а)



б)



-  кровля ММП
-  подошва торфа
-  скважина с отметками
-  подошвы торфа и кровли ММП

