



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ПОМОЩИ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Д.А. Бухтияров, В.Н. Глинских

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: dmitry.bukhtiyarov@yahoo.com*

В работе рассмотрены предпосылки создания установки электромагнитного зондирования грунта с приемной и передающей антеннами, разнесенными на расстояние до 100 метров. Температурные и частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости многослойного глинистого грунта исследованы в совокупности с результатами численного моделирования сверхширокополосных логопериодических антенн, погруженных в грунт на глубину 1.5 м. Обоснован выбор высоковольтного генератора и приемника импульсов, приведена структурная схема макетного образца установки. По результатам измерений осциллограмм и спектров сигналов с разносом антенн на 30 м с привязкой к температуре грунта даны оценки возможных пределов изменения электрофизических параметров глинистого грунта на геофизическом полигоне. Сделаны выводы о способах совершенствования установки для создания новой технологии импульсного электромагнитного мониторинга криолитозоны.

Сверхширокополосные логопериодические антенны, высоковольтные импульсные генераторы, комплексная диэлектрическая проницаемость, криолитозона, мониторинг многолетнемерзлых пород

PRELIMINARY RESULTS OF CLAY SOILS STATE MONITORING USING TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING APPARATUS

D.A. Bukhtiyarov, V.N. Glinskikh

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: dmitry.bukhtiyarov@yahoo.com*

The background for creating an electromagnetic soil sounding apparatus with receiving and transmitting antennas separated by a distance of up to 100 meters is considered in this paper. The temperature and frequency dependences of the complex dielectric permittivity of multilayer clay soil are studied in conjunction with the results of numerical simulation of ultra-wideband log-periodic antennas immersed in the soil to a depth of 1.5 m. The choice of a high-voltage generator and pulse receiver is studied, and a structure of apparatus prototype is given. Based on the results of oscillograms' and signal spectra measurements with 30 m antennas separation, and with reference to the soil temperature, estimates of the possible limits of change in the electrophysical parameters of the clay soil at a geophysical site are provided. Conclusions are drawn about ways to improve the apparatus in order to create a new technology for transient electromagnetic monitoring of permafrost.

Ultra-wideband log-periodic antennas, high-voltage pulse generators, complex permittivity, cryolithozone, permafrost monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Теория и техника георадиолокационного зондирования (Ground Penetrating Radar, GPR) непрерывно развивается и показывает значительные результаты во многих прикладных областях [Гринев,

2005; JoI, 2009]. Отличаясь от классической радиолокации, но в то же время во многом следуя ее основным принципам, несущий полезную информацию сигнал отражается от подземных объектов, неоднородных по своим электрофизическим параметрам. В средах со значительным затуханием электромагнитных волн (ЭМВ) для увеличения глубины зондирования (при наземном расположении передающей и приемной антенны, рис. 1, слева) или дальности межскважинного зондирования (при соответствующем расположении передающей и приемной антенны, рис. 1, справа) энергетический потенциал применяемых георадаров может быть увеличен за счет повышения чувствительности приемника (в меньшей степени) или за счет увеличения амплитуды импульса генератора (в большей степени) при одновременном уменьшении частот используемых сигналов до десятков МГц [Дудник, 2010].

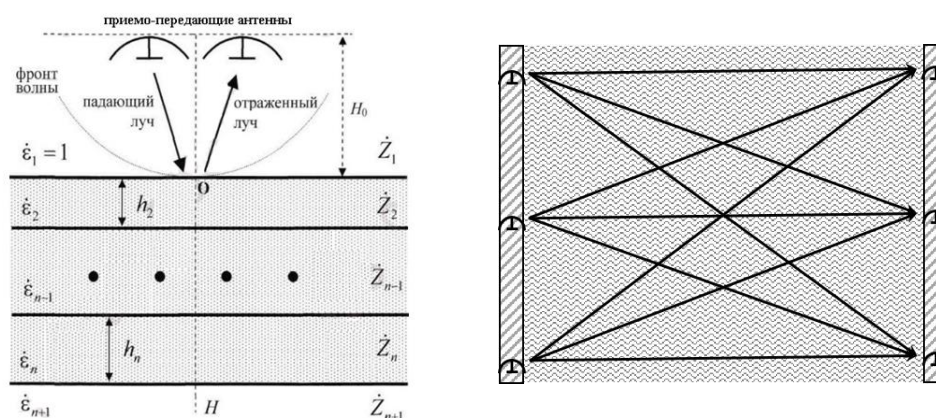


Рис. 1. Наземный (слева) и вертикально-скважинный (справа) способы размещения антенн георадара

Среди современных многофункциональных георадаров можно выделить приборы серий ОКО, Лоза, SIR, PulseEKKO, RAMAC/GPR, Зонд. Оценки их энергетического потенциала на уровне 120–140 дБ даны производителями [Дудник, 2010], при этом амплитуда импульсного сигнала увеличивается за счет сжатия его длительности и расширения спектра, следовательно, генератор и передающий тракт, как минимум до разъема антенны, должны строиться с учетом особенностей сверхширокополосных (СШП) радиосистем. По определению в [Беличенко и др., 2015], в таких системах относительная полоса частот $\eta = 2 \frac{f_{MAX} - f_{MIN}}{f_{MAX} + f_{MIN}}$ превышает значение 0.25, а коэффициент перекрытия по частоте $b = \frac{f_{MAX}}{f_{MIN}}$ превышает 3.

Задача мониторинга многолетней мерзлоты для предупреждения последствий ее деградации и предотвращения техногенных и экологических катастроф (вследствие подмывов дорог, фундаментов зданий и сооружений, образования карстовых полостей и т.д.) является чрезвычайно актуальной. Как следует из публикаций по данному вопросу [Стоянович и др., 2015], георадиолокационные исследования вечной мерзлоты позволяют успешно решать ряд вопросов, в том числе: определение границ залегания льда, измерение пластовой скорости в слоях льда. В то же время актуальным является их совершенствование в таких аспектах, как повышение автономности работы и минимизация участия технического персонала, особенно при увеличении размеров исследуемых объектов или повышении сложности рельефа вокруг них. Представляется [Эпов и др., 2011], что это возможно при разнесении нескольких приемных и передающих блоков, укомплектованных антеннами, в определенные точки исследуемой структуры (в пределе – до 100 м) на требуемой глубине. При этом на второй план отходят такие характеристики, как разрешающая способность георадара по глубине и идентифицируемые размеры неоднородностей грунта.

Цель данной работы – сравнительное описание исходных данных, необходимых для проектирования макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования, и результатов натурных экспериментов по частотно-избирательному распространению электромагнитных волн в приповерхностной толще на геофизическом полигоне в пос. Дорогино (Новосибирская область) в сезоны аградации и деградации грунтов. Для дальнейших работ по созданию программно-алгоритмической и технико-аппаратурной базы нового метода зондирования с управляемым токовым импульсом результаты экспериментов проверяются на соответствие как с уже опубликованными данными, так и с результатами численного трехмерного электродинамического моделирования.

МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ И ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

По результатам предварительно выполненных магнитного профилирования и электротомографии сделан вывод, что грунты приповерхностной толщи обустриваемого геофизического полигона являются преимущественно глинистыми. Для мониторинга их свойств в процессе замерзания и оттаивания на первом этапе на расстоянии 30 м были оборудованы шурфы глубиной 2 м, шириной 1.5 м и длиной 2.5 м, расположение которых с установленными сверху палатками показано на рис. 2.



Рис. 2. Геофизический полигон в пос. Дорогино. Расстояние между палатками над шурфами с приемо-передающей аппаратурой 30 м

Для зондирования толщи грунта на дальность 30 м необходимо было создать установку из источника и приемника сигнала с передающей и приемной антеннами соответственно. Рассмотрим основные исходные данные, принимаемые во внимание при проектировании установки.

При распространении ЭМВ в сплошных средах на больших масштабах можно ограничиться учетом относительной комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) ε , частотная зависимость которой для глинистых грунтов определяется выражением

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon' - i60\sigma c/f, \quad (1)$$

где ε' и ε'' являются действительной и мнимой частями проницаемости, σ – удельная проводимость среды [См/м], c – скорость света в вакууме, f – частота. Другим распространенным форматом представления составляющих КДП является тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'.$$
(2)

Обобщая результаты и рекомендации ряда работ [Jol, 2009; Бухцоож, 2010; Баскаков и др., 2021], в дальнейшем опишем среду распространения сигналов моделью в виде многослойного диэлектрика с различными значениями комплексных диэлектрических проницаемостей по вертикали, причем с одновременным увеличением глубины от 0 до 2 м влажность грунта должна возрасти до 30–35 % [Баскаков и др., 2021], в связи с чем на фиксированной частоте около 50–70 МГц при температуре +20 °С:

- действительная часть КДП равномерно возрастет с 2–4 на поверхности до 8–12 (характер роста останется близким к линейному с дальнейшим ростом влажности);
- мнимая часть КДП практически не изменится и составит около 12 (характер роста изменится на экспоненциальный с дальнейшим увеличением влажности).

В качестве удобного и точного инструмента для оперативного численного трехмерного моделирования распространения ЭМВ в слоистой среде может быть использовано специализированное программное обеспечение CST STUDIO SUITE [Курушин, 2014], возможности которого значительно расширяются при использовании встроенного языка программирования VBA (Visual Basic for Applications).

Экспериментально измеренные температурные зависимости КДП нескольких диэлектриков наглядно демонстрируются в работе [Saarenketo, 2006]. Следует пояснить, что на рис. 3 и 4 представлены данные измерений КДП для искусственной структуры дорожного полотна небольшой (до 20 м) ширины, в которой из-за чередования слоев, существенно различных по материальному составу, вышеупомянутая зависимость КДП от глубины залегания слоя (или его высоты по отношению к основанию дорожного полотна) не прослеживается. Однако при заметном промерзании всех слоев в зимнее время составляющие КДП уменьшаются до близких значений: действительная часть (рис. 3) до 3–5, удельная проводимость (рис. 4) до 5–10. На рисунках 3 и 4 хорошо прослеживаются процессы заморзания и оттаивания, а также суточные колебания значений, составляющих КДП.

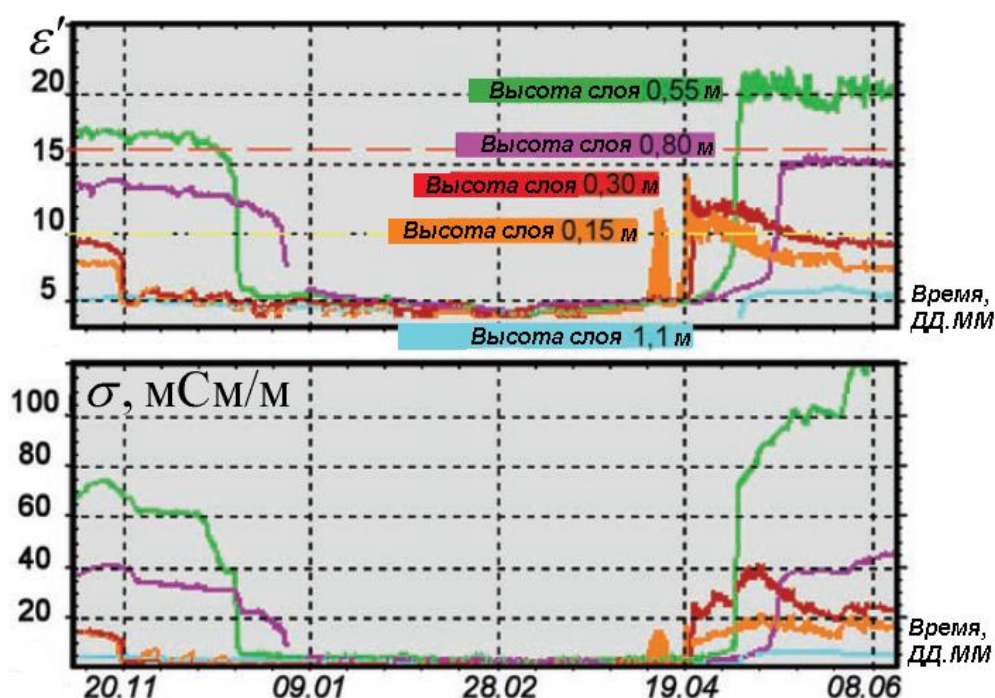


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости различных слоев полотна дороги от времени года (с ноября по июнь) по данным работы [Saarenketo, 2006]

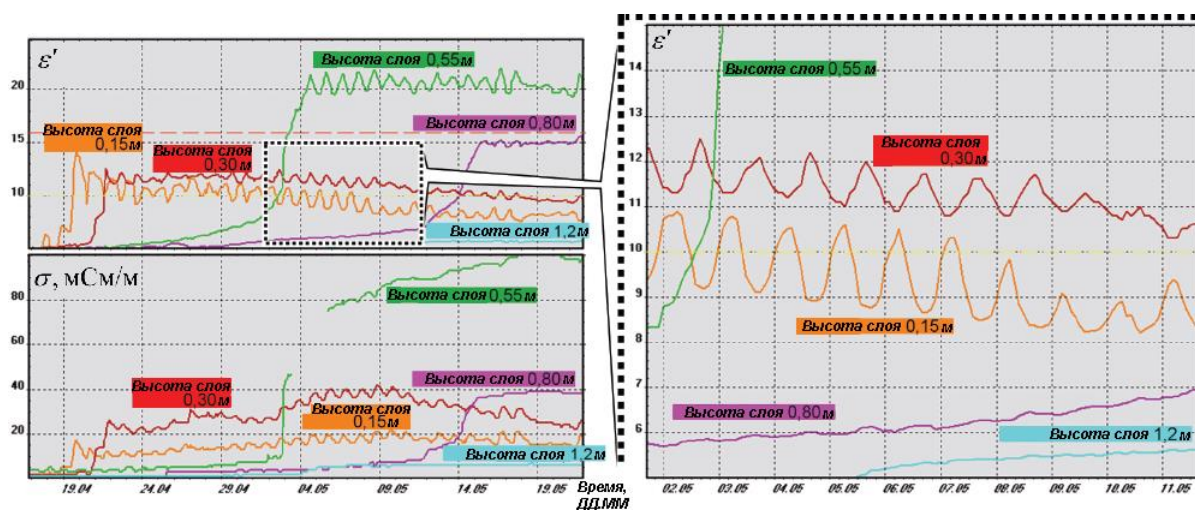


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости различных слоев полотна дороги от времени года (слева – с апреля по май, справа – с 2 по 11 мая) по данным работы [Saarenpäki, 2006]

Выводы о температурной зависимости составляющих КДП, сделанные выше, подтверждаются во многих других источниках. Например, согласно [Изюмов и др., 2008], коэффициент затухания однородной плоской ЭМВ длиной λ , определяемый как $\alpha = \pi \cdot \sqrt{\epsilon'} \cdot tg\delta / \lambda$, в суглинистых и глинистых грунтах уменьшается в 1.5–2 раза при уменьшении температуры грунта на 20 °С (при условии $T > 0$ °С).

МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ В ЧАСТИ ЗАВИСИМОСТИ ϵ ОТ ЧАСТОТЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

Для дальнейшего сравнения ограничимся двумя моделями глинистых грунтов с числом слоев, равным 15, и толщиной каждого слоя 13 см, в пакете CST STUDIO SUITE:

– первая модель для температуры +20 °С, действительная часть КДП линейно растет с 4.28 для слоя № 1 (граничит с верхним полубесконечным пространством) до 11 для слоя № 15, удельная проводимость всех слоев $\sigma = 50$ мСм/м;

– вторая модель для температуры –20°С, действительная часть КДП линейно растет с 4.04 для слоя № 1 (граничит с верхним полубесконечным пространством) до 4.64 для слоя № 15, удельная проводимость всех слоев $\sigma = 10$ мСм/м.

После ввода данных параметров в соответствующие настройки материалов CST STUDIO SUITE для каждого из 15 слоев автоматически будут построены графики частотных зависимостей составляющих КДП и тангенса угла диэлектрических потерь. Ниже приведены графики для слоя № 11 и температур –20 °С и +20 °С: на рис. 5 – мнимая часть КДП, на рис. 6 – тангенс угла диэлектрических потерь.

Механизм влияния частотной дисперсии глинистых грунтов на параметры распространения ЭМВ в достаточной степени изложен в [Изюмов и др., 2008]. На графиках тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 6) можно условно выделить две области: высокочастотную, где грунт является диэлектриком и $tg\delta \ll 1$, и низкочастотную, где грунт является проводником и $tg\delta \gg 1$. Сильное ослабление высокочастотных компонент сигнала приводит к явлению диффузного распространения ЭМВ. При этом в спектре принятого сигнала тем сильнее преобладают низкочастотные компоненты, чем меньше проводимость грунта. С уменьшением длительности импульса или размеров антенн можно увеличивать расстояние между ними, при этом будет наблюдаться устойчивый прием низкочастотной компоненты сигнала.

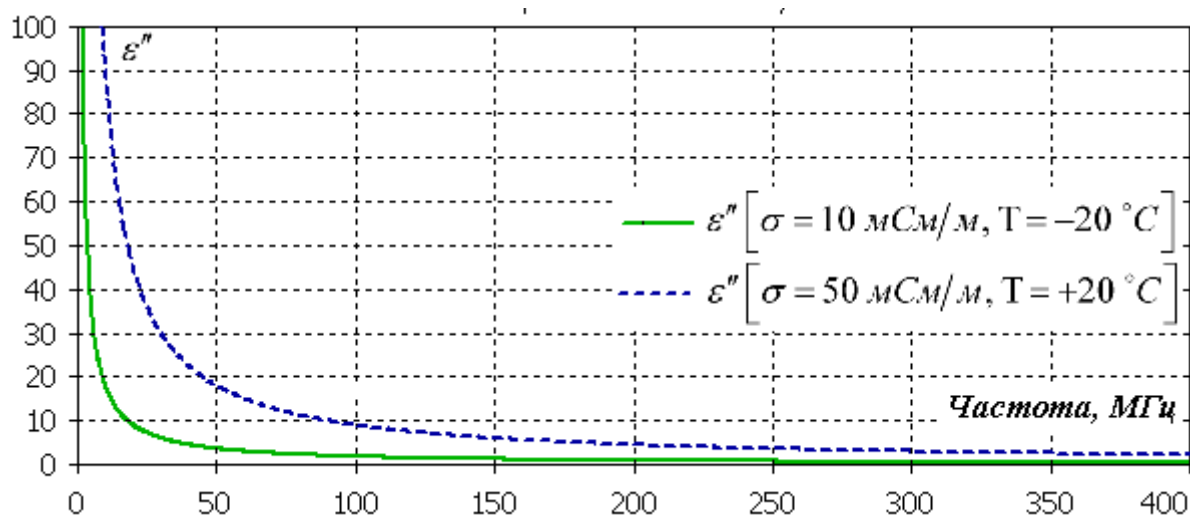


Рис. 5. Частотные зависимости мнимой составляющей КДП слоя глинистого грунта в CST STUDIO SUITE

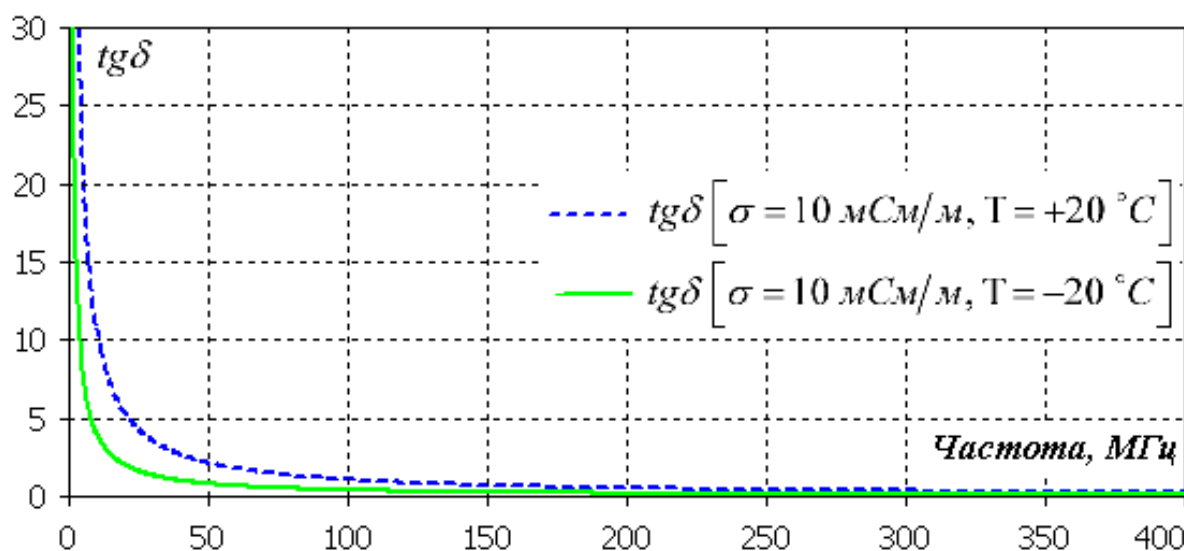


Рис. 6. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь слоя глинистого грунта в CST STUDIO SUITE

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН В ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЕ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ПАКЕТЕ CST STUDIO SUITE

Исходными параметрами для проектирования антенн установки импульсного электромагнитного зондирования является диапазон рабочих частот установки: с одной стороны, ожидаемые потери в глинистых грунтах делают невозможным распространение в среде сигналов с частотами выше 20 МГц; с другой стороны, при сжатии длительности импульса до 1 нс для увеличения его амплитуды верхняя граничная частота в спектре импульса достигнет 400 МГц. В связи с поисковым характером работ, когда параметры распространения ЭМВ в грунте не могут быть известны заранее, в первую очередь необходимо обеспечить приемлемые параметры передающей антенны как нагрузки высоковольтного генератора импульсов. Так, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) передающей антенны не должен превышать значения 2 в диапазоне частот от единиц до 400 МГц с целью исключения поражения узлов генератора отраженной мощностью.

С позиции выбора типа антенны по критерию минимального КСВН в широкой полосе частот линейные антенны, резистивно-демпфированные по закону Ву-Кинга [Газизов, 2013], уступают логопериодическим дипольным антеннам (ЛПДА), хотя при этом имеют несравнимо лучшие массо-габаритные характеристики. В связи с этим в качестве передающей и приемной антенн были использованы СШП ЛПДА, проводники которых изолированы от сплошной среды внутри герметичного радиопрозрачного корпуса. Структура антенны схематично показана на рис. 7.

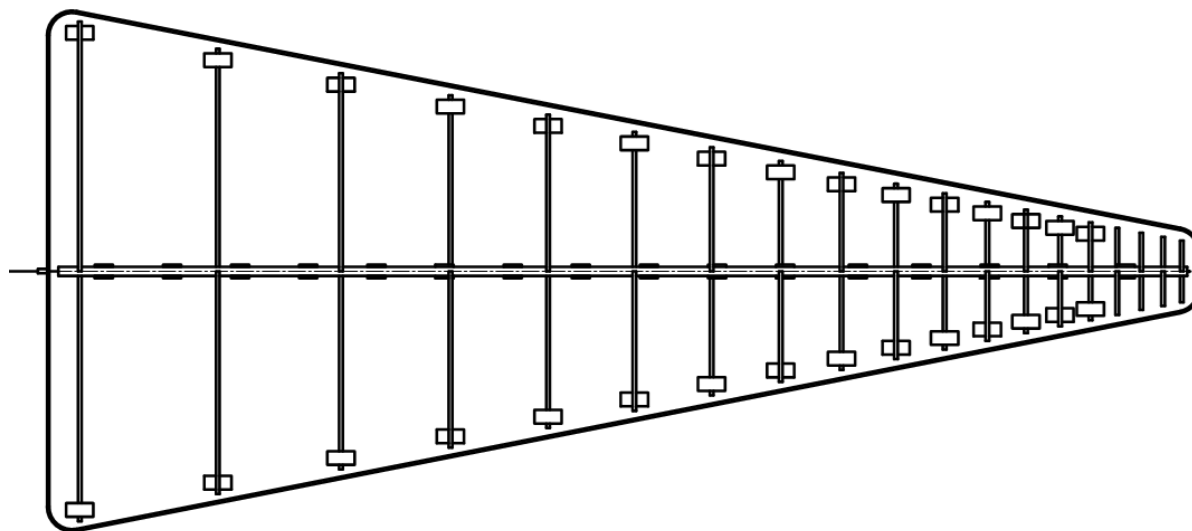


Рис. 7. Эскиз СШП ЛПДА со снятой крышкой (вид сверху)

На рисунке 7 к задней широкой части антенны подведен питающий коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, длиной 0.5 м. Внешние габариты антенны составляют 1156 x 2550 x 73 мм, антенна содержит 19 диполей. Излучение и прием СШП сигнала в виде периодической последовательности коротких импульсов в ЛПДА возможны благодаря выполнению принципа электродинамического подобия: при распространении ЭМВ по несущей двухпроводной линии в сторону от коротких диполей к длинным на каждой отдельно взятой частоте излучает так называемая активная зона антенны, содержащая резонирующий диполь с максимальным током и ближайшие с обеих сторон диполи (от 2 до 5) с током на 10 дБ меньше максимального. При изменении частоты активная зона перемещается вдоль антенны без сильного изменения своих относительных (в долях длины волны) размеров. Нижние и верхние плечи соседних диполей имеют гальванический контакт с различными проводниками несущей линии, которая со стороны низкочастотного диполя с наибольшей длиной нагружена на согласованный резистор 50 Ом. Продолжение питающего коаксиального кабеля размещено внутри нижней трубки и на входных клеммах (в передней узкой части антенны, со стороны самого короткого диполя, кабель распаян экранной оболочкой на нижнюю, а центральной жилой – на верхнюю трубку).

Анализ литературы показал, что подробных методик расчета конкретных геометрических параметров ЛПДА в сплошной среде не существует. Поэтому полностью параметрическая модель СШП ЛПДА создается в пакете CST STUDIO SUITE, а начальные значения параметров, определяющих облик антенны в первом приближении, рассчитываются на основе классической методики, изложенной в [Петров и др., 2005]. После задания размерностей, диапазона частот, параметров слоев, граничных условий и свойств материалов отдельные части антенны создаются на основе геометрических примитивов с

использованием возможностей встроенного языка VBA [Пластиков, 2012]. Далее создается симметричный порт возбуждения, генерируется сетка и выбирается решающее устройство во временной области с порогом стабильности, зависящим от длительности распространения сигналов (в пределе до -100 дБ). После этого стартовые значения геометрических параметров уточняются при помощи встроенного оптимизатора. Минимизируемая аддитивная целевая функция задается на основе частотных зависимостей КСВН антенны и напряженности поля в удаленной точке слоистой среды. Финальный облик модели антенны в слоистой среде показан на рис. 8, в левой части которого указаны значения действительной части КДП соответствующих слоев для температуры $+20^\circ\text{C}$.

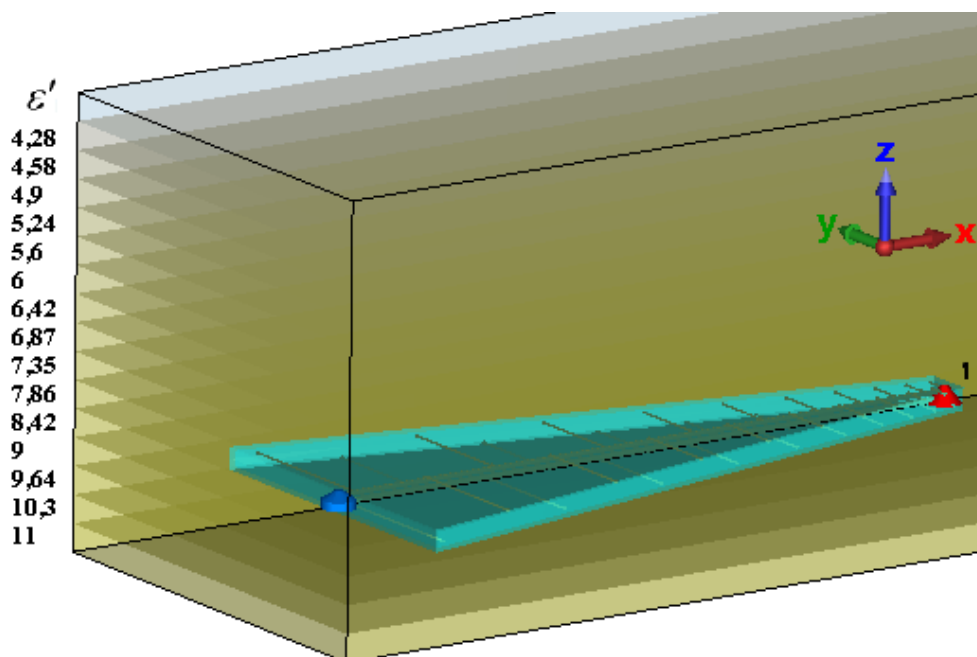


Рис. 8. Ориентация модели передающей антенны в слоистой среде

Приемная антенна размещается зеркально-симметрично по отношению к передающей, на одинаковой глубине, однако ограниченные вычислительные ресурсы и ряд особенностей используемых сеточных методов моделирования не позволяют получить корректные результаты при разnose антенн более чем на 6 м. В связи с этим, качественно опишем основные результаты моделирования: на рис. 9 представлены графики частотных зависимостей КСВН передающей антенны при разных температурах.

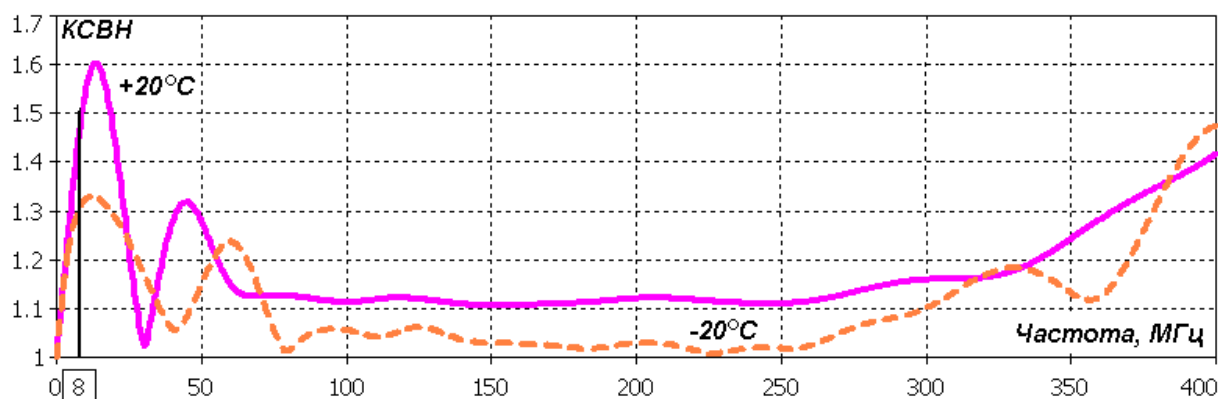


Рис. 9. Частотные зависимости КСВН передающей антенны при разных температурах

Как следует из данных рис. 9, в полосе частот от 0 (постоянный ток) до 400 МГц значение КСВН не превышает 1.6 при температуре +20°C, снижаясь с уменьшением температуры.

На рисунке 10 представлены графики частотных зависимостей мощности, поглощаемой в моделируемом объеме слоистой диэлектрической среды, нормированной на мощность на входе передающей антенны, при разных температурах.

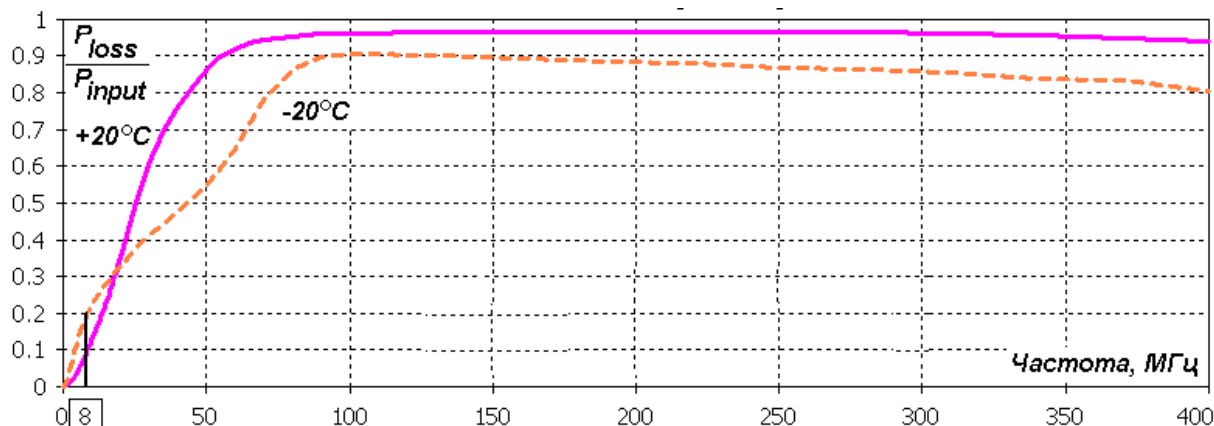


Рис. 10. Частотные зависимости потерь мощности сигнала в моделируемом объеме слоистой среды, нормированной к мощности на входе антенны

Данные на рис. 10 полностью соответствуют изложенным ранее для частот выше 20 МГц – с увеличением температуры поглощение мощности в среде возрастает. Небольшое расхождение в окрестности частоты 8 МГц объясняется тем, что преобладание других потерь (в основном на отражение, рис. 9) привели к снижению мощности излучения, поэтому она не могла быть поглощена в среде.

На рисунке 11 представлены частотные зависимости коэффициентов передачи между антеннами при разных температурах, при этом приемнику с портом № 2 соответствует источник с портом № 1.

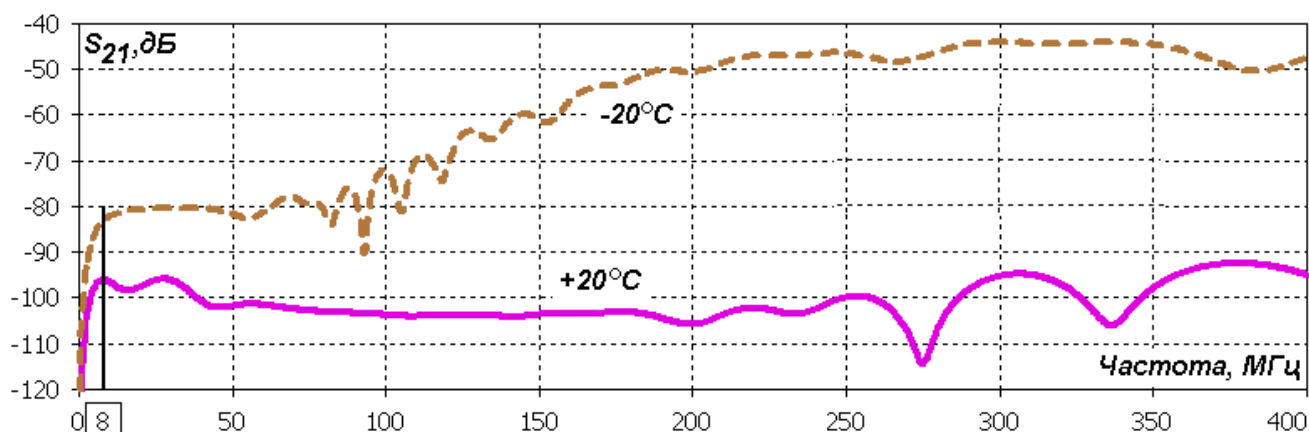


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициентов передачи между антеннами

При дальнейшем увеличении расстояния между антеннами высокие потери на частотах более 20 МГц приведут к уменьшению коэффициента передачи ниже –160 дБ при любой температуре, при этом в окрестности частот 7–12 МГц, даже при +20°C, коэффициент передачи будет выше –140 дБ, что полностью согласуется с ранее изложенной теорией.

Отражения зондирующего сигнала от наземных объектов, равно как и паразитный прием сигнала, распространяющегося по воздуху, являются известными проблемами георадиолокации; их решение на этапе обработки и интерпретации сигналов в значительной степени затруднено. Аппаратные способы предотвращения данных явлений не всегда реализуемы, однако в данной работе:

- при проектировании ЛПДА учитывались характеристики среды распространения ($KCBH \leq 1/6$), в то время как при размещении антенн в воздухе $KCBH$ превышает 2.5: вследствие этого сигнал, принятый на расстоянии 30 м и более, содержит множество копий значительно ослабленного (около -70 дБ) импульса высоковольтного генератора;
- далее при размещении антенн в шурфах измеряемый $KCBH$ снижается, при этом сигнал прямого прохождения затухает еще сильнее и более не регистрируется.

Пространственная зависимость электромагнитного поля, излучаемого ЛПДА, практически близка к изотропной на частотах ниже 150 МГц, далее с ростом частоты выше 200 МГц происходит фокусировка излучения в сторону от длинных диполей к коротким.

На основе полученных результатов моделирования, дополним ожидаемые результаты экспериментального зондирования: при любых температурах можно подобрать параметры генератора, приемника и трактов установки и добиться устойчивого приема сигналов в диапазоне частот 7–10 МГц. При этом оценка времени распространения сигнала в слоистом грунте на расстояние 30 м может быть дана согласно выражению для фазовой скорости ЭМВ в сплошной среде [Curtis et al., 1995] для температуры -20°C :

$$\begin{aligned} \tau|_{-20^\circ\text{C}} = 30\text{м}/v_{\text{фаз}} &= \frac{\beta \cdot 30\text{м}}{\omega} = \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}}{c} = \\ &= \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{4,45}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{18,7}{4,45}\right)^2} + 1 \right)}}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})} = 334 \text{ нс}, \end{aligned} \quad (3)$$

и для температуры $+20^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} \tau|_{+20^\circ\text{C}} = 30\text{м}/v_{\text{фаз}} &= \frac{\beta \cdot 30\text{м}}{\omega} = \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}}{c} = \\ &= \frac{30\text{м} \sqrt{\frac{8,4}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{93}{8,4}\right)^2} + 1 \right)}}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})} = 714 \text{ нс}. \end{aligned} \quad (4)$$

Конкретные значения составляющих ε' и ε'' КДП в (3) и (4) соответствуют частоте 9.6 МГц на рис. 5 и 6. Данная оценка качественно совпадает с результатами трехмерного моделирования, где с увеличением температуры задержка также возросла, но всего лишь на 35 % – по причине гораздо меньшего расстояния между антеннами, что отражено в недостаточном ослаблении высокочастотных составляющих сигнала на рис. 11 при температуре -20°C .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Основой создания установки с требуемым потенциалом является обеспечение как можно большей амплитуды импульса высоковольтного генератора ударного возбуждения передающей антенны. Упрощенная структурная схема большинства подобных генераторов представлена на рис. 12.

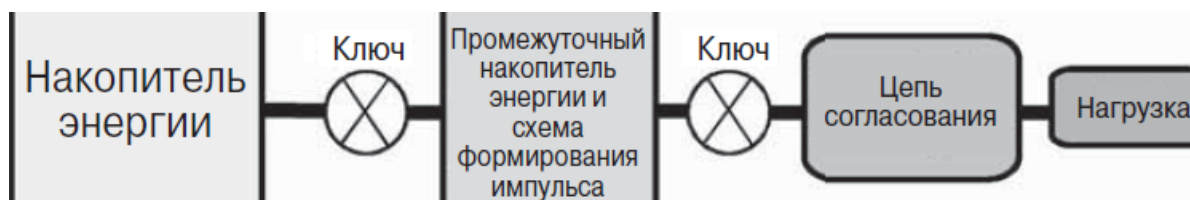


Рис. 12. Упрощенная структурная схема высоковольтного генератора

При увеличении амплитуды импульса до единиц и десятков киловольт длительность импульса может уменьшаться с сотен до единиц наносекунд. Исходя из требований к надежности ключей генератора, частота следования импульсов не может превышать 10–20 кГц. В процессе исследования современных технологий генерации высоковольтных импульсов было рассмотрено применение как электровакуумных ключей (газоразрядных приборов), так и полупроводниковых ключей. Среди последних можно выделить серийно выпускаемые *n-p-n* транзисторы в режиме лавинного пробоя, специализированные лавинные транзисторы, кремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ).

Для создания макетного образца установки было решено использовать генератор PPM0731 производства ООО «Мегаимпульс». По результатам выходного контроля установлены основные параметры: амплитуда импульсов 6.45 кВ, ширина импульса на полувысоте 400 пс, максимальная частота повторения 10.8 кГц. Достоинствами генератора являются высокая скорость нарастания выходного напряжения, минимальный джиттер, высокие значения КПД, компактности и надежности. Осциллограмма импульса представлена на рис. 13, соответствующий ей спектр – на рис. 14.

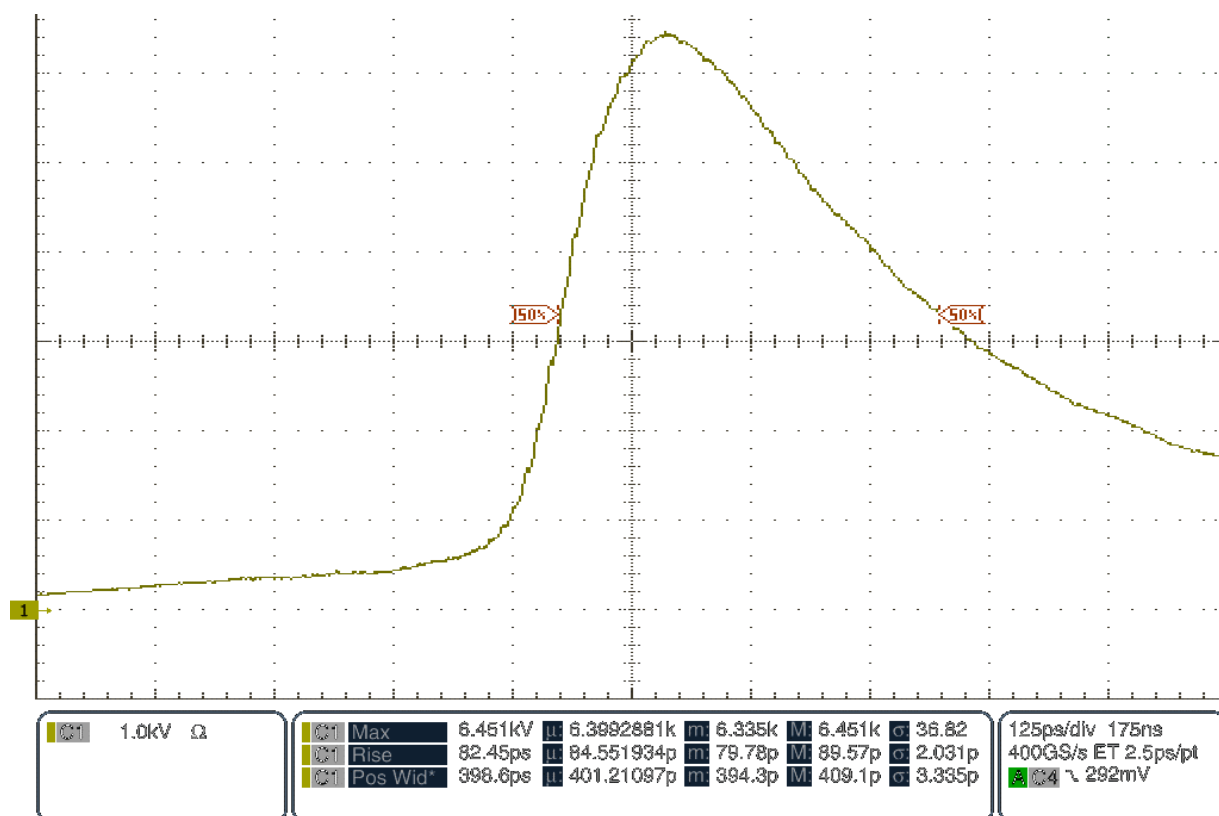


Рис. 13. Осциллограмма импульса высоковольтного генератора PPM0731 (125 пс/деление, размах 6.5 кВ)

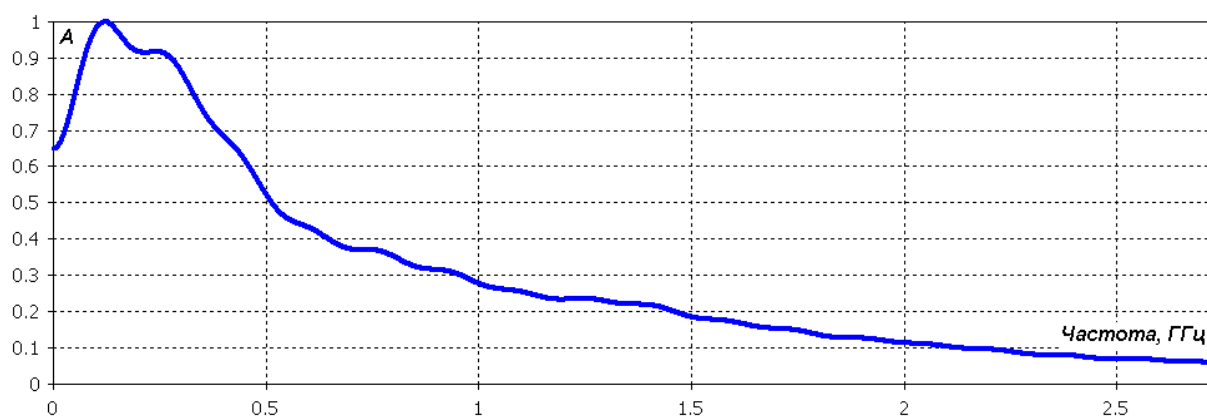


Рис. 14. Нормированный спектр импульса высоковольтного генератора PPM0731

В соответствии с изложенными ранее ожидаемыми результатами, длительность отдельных всплесков импульса, прошедшего сквозь исследуемый грунт, увеличится с единиц до десятков наносекунд, что, в совокупности с необходимостью максимально точного измерения задержки времени прихода ЭМВ через грунт, не снижает требования к быстродействию и термостабильности приемника в широком диапазоне температур.

Для создания макетного образца установки анализировались решения таких производителей, как Keysight (Agilent Technologies), Amplifier Research, Anritsu, Keithley Instruments, LeCroy, Rohde & Schwarz, Tektronix, АКИП, Актаком. Наиболее доступными признаны измерительные приборы производства компании Pico Technology, на отечественном рынке представленные под торговой маркой АКИП. В результате было решено использовать стробоскопический осциллограф АКИП-4112/2, параметры которого превосходят все имеющиеся требования к приемнику установки.



Рис. 15. Внешний вид высоковольтного генератора PPM0731 (слева) и стробоскопического осциллографа АКИП-4112/2 (справа)

Исходя из реальной чувствительности осциллографа 3.7 мВ, нижняя оценка энергетического потенциала установки составляет $20 \log \left(\frac{6500 \text{ В}}{3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right) = 124,9 \text{ дБ}$. Предполагается, что в реальности потенциал будет больше, в том числе за счет коэффициента усиления антенн, однако его расчет (тем более измерение) является чрезвычайно сложной задачей. Потенциал также может быть увеличен при включении маломощного СШП-усилителя непосредственно на выход приемной антенны.

Структурная схема макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования представлена на рис. 16.

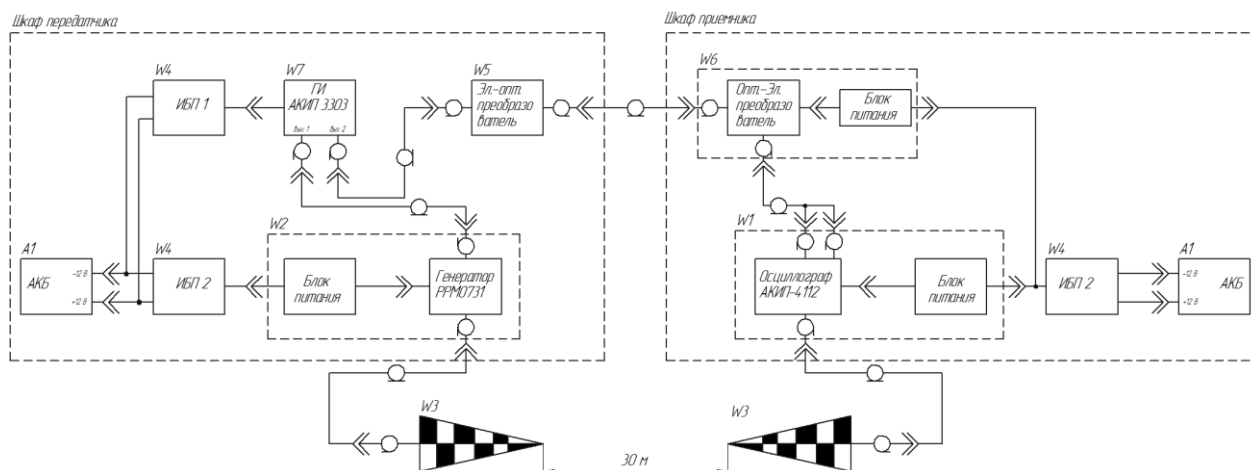


Рис. 16. Структурная схема макетного образца установки импульсного электромагнитного зондирования

На рисунке 16, помимо описанных выше антенн, генератора и приемника, можно отметить вспомогательные элементы: источники бесперебойного питания, аккумуляторные батареи, электрооптический и оптико-электронный конвертеры сигналов, генератор импульсов запуска и синхронизации, а также комплекты стандартных кабельных сборок.

Внешний вид шурфов, в которых размещались антенны и приемно-передающее оборудование установки, показаны на рис. 17 в летнее время: ранее извлеченный из шурфов грунт для удобства расфасован по мешкам. В дальнейшем шурфы заполняются грунтом как можно более плотно, в шурфах также остаются контейнеры, герметично закрытые и связанные с поверхностью только оптоволоконными кабелями.



Рис. 17. Внешний вид шурфов перед началом исследований

Часть оборудования установки в виде разворачиваемого стенда размещается на поверхности и, в том числе, ноутбук со специализированным программным обеспечением: для контроля и управления осциллографом и генераторами, для управления реле узлов электропитания аппаратуры. Для регистрации температуры рядом с одним из шурфов была вырыта скважина глубиной 2 м, в которой размещен кабель с термодатчиками. Скважина заполнена грунтом как можно более плотно. Длина кабеля и количество датчиков позволяет регистрировать температуру на поверхности и глубинах 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 и 2.0 м. Термодатчики кабеля подключаются к ноутбуку установки, что позволяет оперативно регистрировать данные в виде «время – температура» одновременно с сохранением осциллограммы принятого сигнала.

Работа с установкой в основном предполагает измерение температуры, запуск высоковольтного генератора на время, достаточное для настройки параметров приемника, сохранение осциллограммы и выключение генератора.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 1 представлены результаты измерений температуры (°C) на разных глубинах в разные дни; всего было проведено 11 измерений.

Таблица 1

Зависимость температуры от времени измерения на разных глубинах

Глубина	0.0м	0.05м	0.1м	0.2м	0.3м	0.5м	0.7м	1.0м	1.5м	2.0м
Дата										
28.01.2022	13.31	11.62	7.94	7.62	6.12	4.50	3.62	0.62	1.31	2.81
04.02.2022	15.81	9.38	7.06	7.00	5.94	4.88	4.38	1.50	0.81	2.44
11.02.2022	17.31	15.56	12.12	11.12	9.06	6.88	5.50	2.12	0.44	2.06
17.02.2022	9.94	9.94	8.25	8.62	7.50	6.56	6.06	3.00	0.12	1.75
24.02.2022	6.69	7.38	6.31	6.94	6.12	5.44	5.25	2.75	0.19	1.44
04.03.2022	7.19	7.25	5.69	6.19	5.31	4.56	4.44	2.31	0.38	1.19
10.03.2022	6.88	6.56	4.38	4.44	3.69	3.12	3.56	2.00	0.44	1.06
17.03.2022	9.44	9.69	7.62	7.62	6.38	5.06	4.62	2.31	0.44	0.94
24.03.2022	5.56	6.31	5.19	6	5.38	4.62	4.81	2.62	0.62	0.81
01.04.2022	0.69	2.25	2.75	3.94	3.56	3.38	3.81	2.12	0.69	0.69
08.04.2022	0.25	1.12	0.19	1.12	1	1.12	2.06	1.19	0.5	0.62

Анализ данных в табл. 1 наглядно демонстрирует то, что добиться глубокого промерзания грунта на полигоне не удалось, и на большинстве глубин, включая глубину размещения антенны, температура изменяется в небольших пределах. С учетом этого далее приведем результаты экспериментов. Целесообразно представить осциллограмму с максимальной зарегистрированной амплитудой на рис. 18,

поскольку осциллограммы, измеренные в другие дни, качественно совпадают с ней по форме и весьма незначительно отличаются по длительности огибающей и положению отдельных полуволн на оси времени.

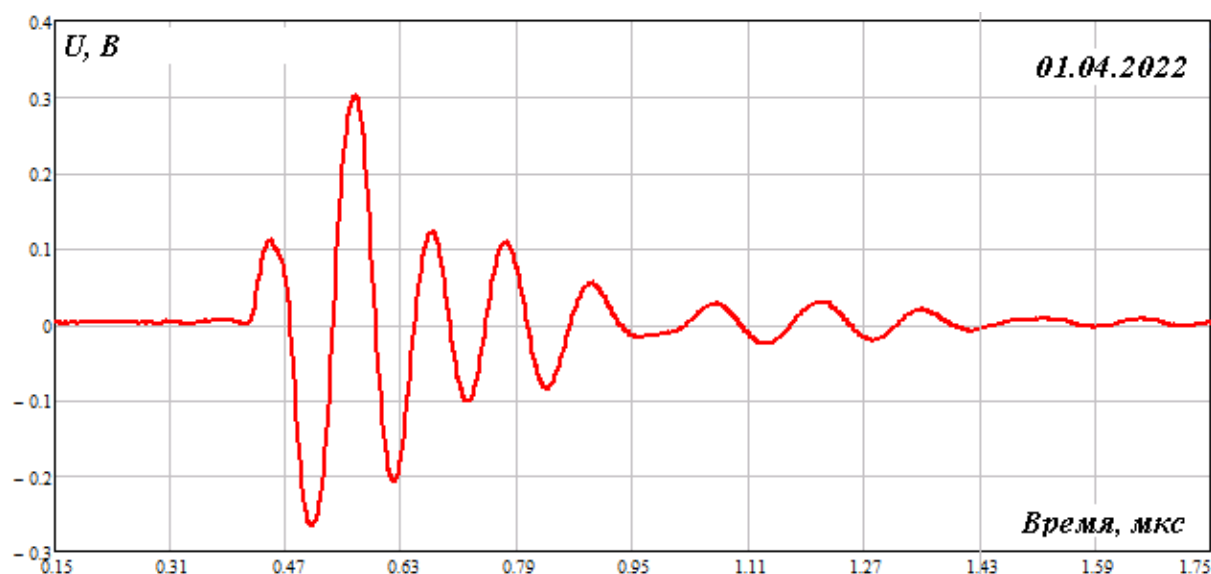


Рис. 18. Осциллограмма сигнала на выходе приемной антенны. Дата измерения 01.04.2022

Тем не менее, при построении в левой части рис. 19 временных зависимостей температур слоев, а в правой части – максимальных амплитуд осциллограмм сигналов, измеренных в соответствующие дни, можем качественно увидеть, что с уменьшением температуры на глубинах 1–2 м максимальная регистрируемая амплитуда возрастает в полном соответствии с теорией. При небольшом росте температуры в последний день амплитуда уменьшилась значительно, что можно объяснить неточностью измерений.

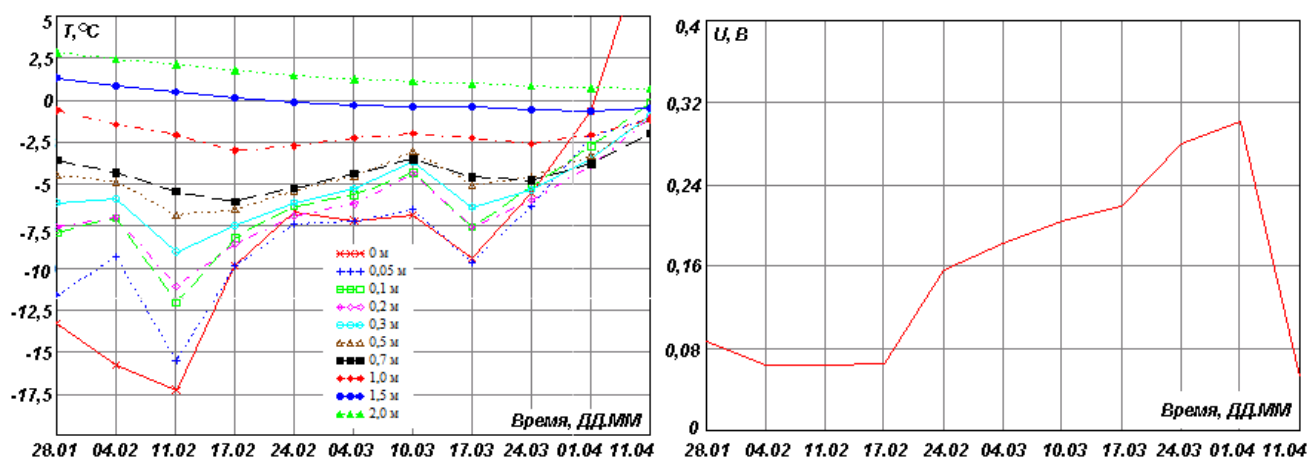


Рис. 19. Временные зависимости температур слоев грунта (слева) и максимальной зарегистрированной амплитуды принятого сигнала (справа)

Далее, при анализе спектров принятых сигналов на рис. 20–30, необходимо определить, действительно ли при снижении температуры более ярко выраженной становится условно низкочастотная (левее максимума) часть спектра, и наоборот.

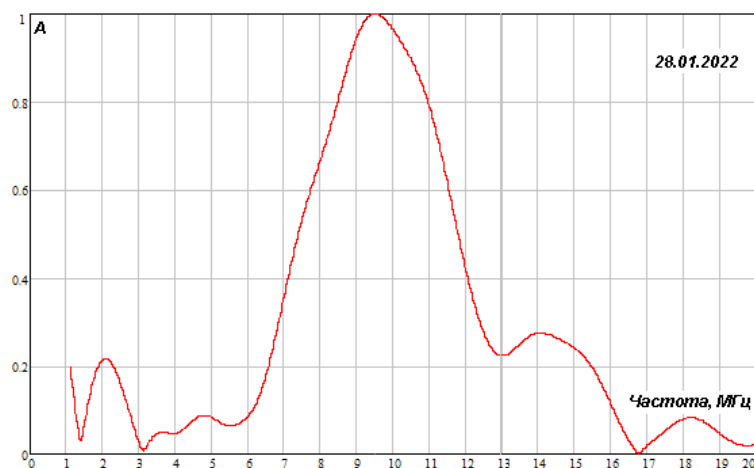


Рис. 20. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 28.01.2022, температура +1.31 °С на глубине 1.5 м

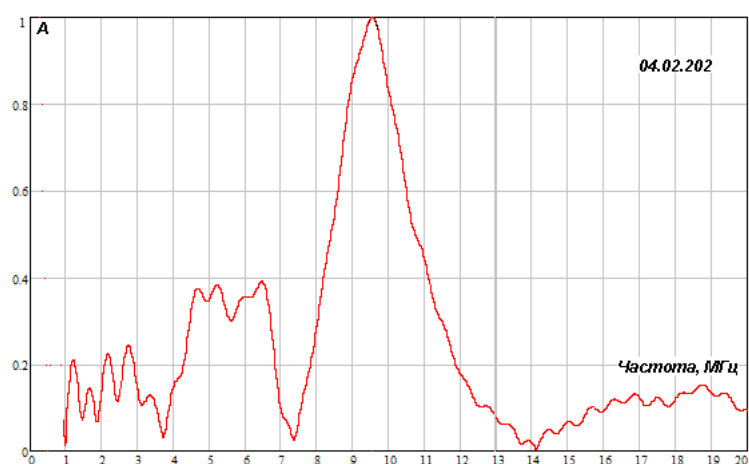


Рис. 21. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 04.02.2022, температура +0.81 °С на глубине 1.5 м

На рисунке 21 низкочастотные компоненты более выражены по сравнению с рис. 20, однако характер изменений достаточно резкий по сравнению с незначительным падением температуры.

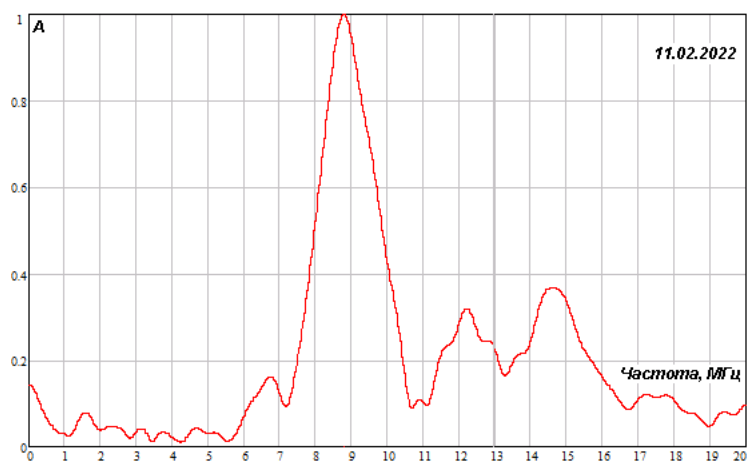


Рис. 22. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 11.02.2022, температура +0.44 °С на глубине 1.5 м

На рисунке 22 в спектре вновь преобладает высокочастотная область, можно лишь отметить уменьшение частоты максимума спектра на 0.7 МГц.

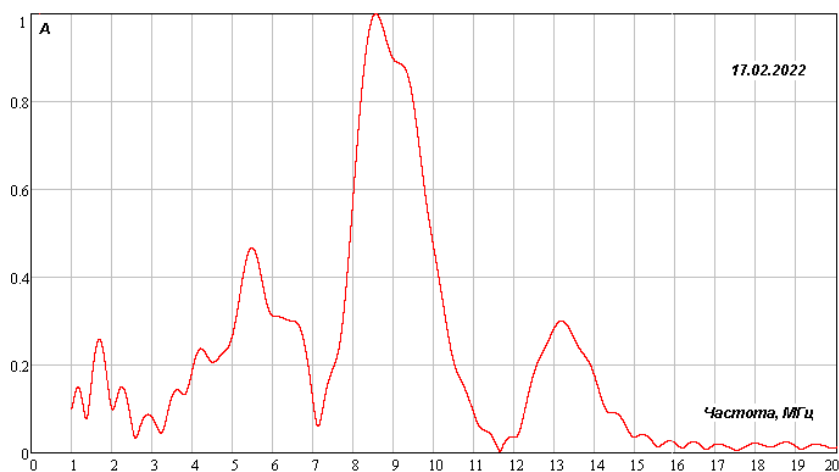


Рис. 23. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 17.02.2022, температура $+0.12^{\circ}\text{C}$ на глубине 1.5 м

На рисунке 23 низкочастотная область преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра уменьшилась еще на 0.22 МГц.

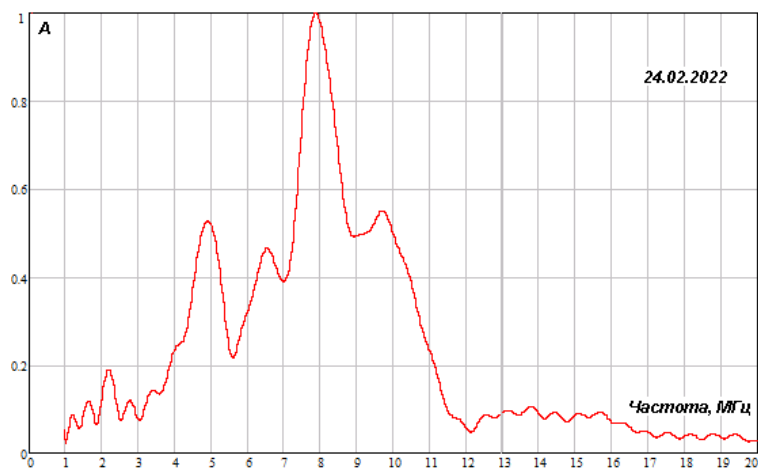


Рис. 24. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 24.02.2022, температура -0.19°C на глубине 1.5 м

На рисунке 24 низкочастотная область значительно преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра уменьшилась еще на 0.7 МГц.

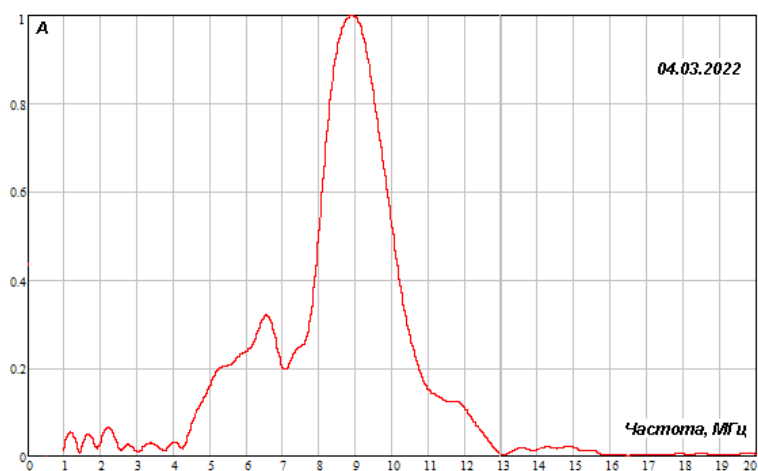


Рис. 25. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 04.03.2022, температура -0.38°C на глубине 1.5 м

На рисунке 25 низкочастотная область значительно преобладает над высокочастотной, при этом частота максимума спектра увеличилась.

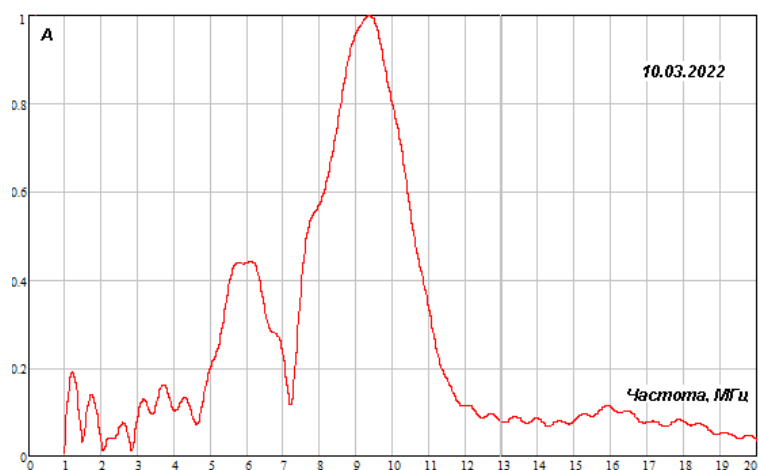


Рис. 26. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 10.03.2022, температура -0.44°C на глубине 1.5 м

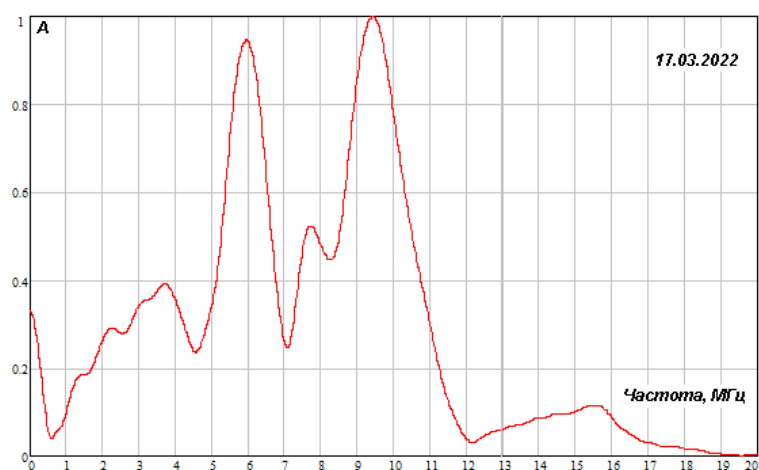


Рис. 27. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 17.03.2022, температура -0.44°C на глубине 1.5 м

На рисунках 26–27 низкочастотные области преобладают над высокочастотными столь значительно, что побочный пик спектра слева от основного максимума может сравняться с ним по уровню. На рисунках 28–30 побочный пик еще выражен заметно, но его уровень начинает снижаться вместе с замедлением падения температуры слоя.

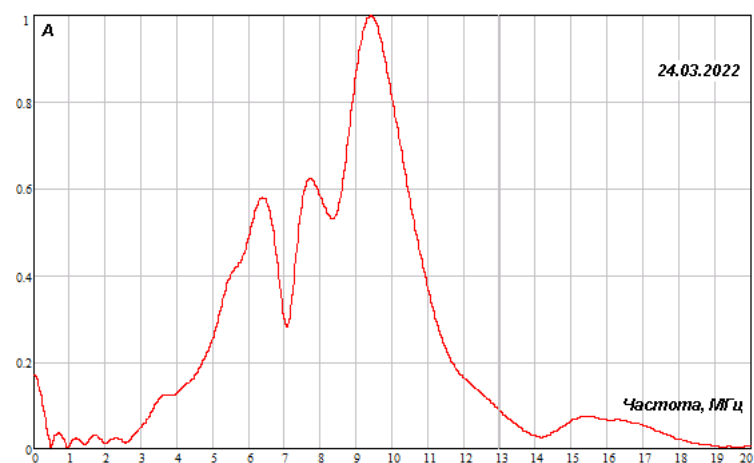


Рис. 28. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 24.03.2022, температура -0.62°C на глубине 1.5 м

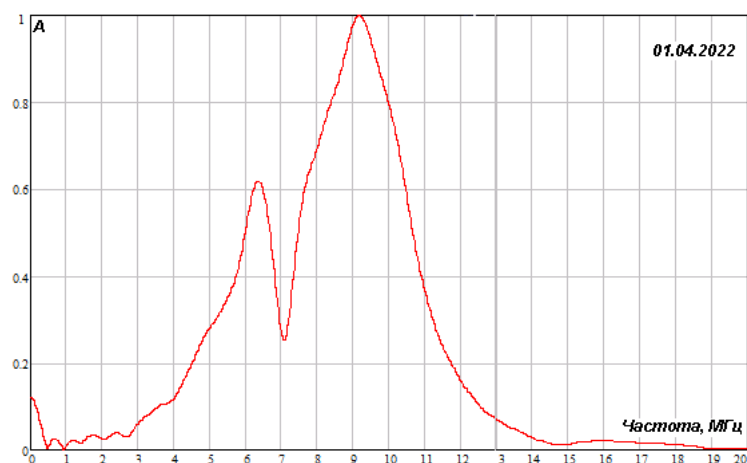


Рис. 29. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 01.04.2022, температура -0.69°C на глубине 1.5 м

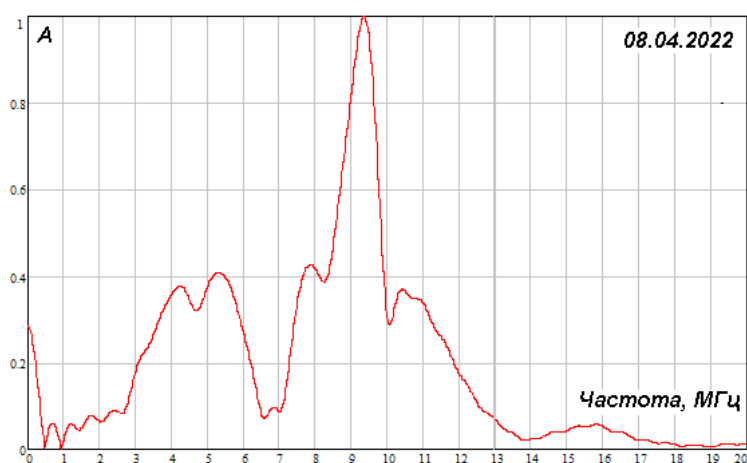


Рис. 30. Нормированный спектр осциллограммы, измеренной 08.04.2022, температура -0.5°C на глубине 1.5 м

Полученные результаты качественно подтверждают то, что с уменьшением температуры слоя грунта на глубине размещения антенны также уменьшается проводимость диэлектрика, в результате меньшее затухание испытывают условно «низкочастотные» спектральные составляющие сигнала – слева от максимума, и наоборот.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные данные качественно соответствуют известным классическим закономерностям и результатам численного моделирования. Модернизация установки импульсного электромагнитного зондирования в части повышения точности измерений пределов изменения усредненных параметров среды и воспроизводимости экспериментов при увеличении расстояния между антеннами до 100 м планируется на следующем этапе. Одновременно с этим планируется привлечение методов машинного обучения для анализа временного и спектрального окраса принятых сигналов, интерпретация которых позволит получить дополнительные данные.

Измерения разности задержек распространения сигнала в грунте и по оптоволокну будут выполнены после модернизации установки. В рамках модернизации предполагается снижение массогабаритных показателей антенн и передаточного оборудования, а также упрощение способа закладки/извлечения антенн и оборудования из шурфов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны», <https://rscf.ru/project/22-17-00181/>.

ЛИТЕРАТУРА

- Баскаков А.И., Одсурэн Б., Комаров А.А., Тувдендоорж Г.** Энергетические характеристики георадара на беспилотном носителе для поиска водоносного слоя в засушливых районах // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 7, doi: 10.30898/1684-1719.2021.7.10.
- Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И.** Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. – Новосибирск: Наука, 2015. – 483 с.
- Бухцоож О.** Комплексирование радиолокационной системы подповерхностного зондирования для повышения информативности и улучшения результатов измерения путем модификации приемного тракта георадара // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 5. – 15 с., <http://jre.cplire.ru/jre/may10/4/text.pdf>.
- Газизов Т.Т.** Синтез оптимальных проводных антенн. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 120 с.
- Гринев А.Ю.** Вопросы подповерхностной радиолокации. – М.: Радиотехника. – 2005. – 416 с.
- Дудник А.В.** Методы оптимизации энергетического потенциала радиотехнических приборов подповерхностного зондирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Москва, 2010. – 131 с.
- Исюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С.** Теория и методы георадиолокации: учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
- Курушин А.А.** Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. – М.: One Book, 2014. – 434 с.
- Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин Е.В.** Логопериодические вибраторные антенны: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 239 с.
- Пластиков А.Н.** Автоматизация процесса проектирования антенн и устройств СВЧ в современных программных комплексах электродинамического моделирования. Часть 2. Особенности моделирования ЛПВА в среде CST Microwave Studio // Современная электроника. – 2012. – № 4. – С. 52–56.
- Стоянович Г.М., Пупатенко В.В., Сухобок Ю.А.** Поиск погребенных льдов методом георадиолокации при реконструкции железных дорог // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах (Новосибирск, 24–26 сентября 2015 года): Материалы симпозиума. – Новосибирск, 2015. – С. 78–84.
- Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В.** Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 114 с.
- Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J.B.** Effect of soil composition on dielectric properties. – US Army Corps Eng. Waterw. Exp. Station, Vicksburg, MS, 1995 – Tech. Rep. EL-95-34.
- Jol H.M.** Ground penetrating radar: theory and applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 543 p.
- Saarenketo T.** Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys. PhD Thesis. – Acta Universitatis Ouluensis, 2006. – 121 p.

REFERENCES

- Baskakov A.I., Odsuren B., Komarov A.A., Tuvdendoorzh G.** Energy characteristics of a ground penetrating radar on an unmanned carrier for searching for an aquifer in arid regions // Journal of Radioelectronics [electronic journal]. – 2021. – Vol. 7, doi: 10.30898/1684-1719.2021.7.10.

- Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I.** Ultrawideband pulsed radio systems. – Nauka, Novosibirsk, 2015. – 483 p.
- Bukhtsoozh O.** Integration of a subsurface sounding radar system to increase the information content and improve the measurement results by modifying the GPR receiving path // Journal of Radioelectronics. – 2010. – Vol. 5. – 15 p., <http://jre.cplire.ru/jre/may10/4/text.pdf>.
- Curtis J.O., Weiss C.A., Everett J.B.** Effect of soil composition on dielectric properties. – US Army Corps Eng. Waterw. Exp. Station, Vicksburg, MS, 1995 – Tech. Rep. EL-95-34.
- Dudnik A.V.** Methods for optimizing the energy potential of radio engineering devices for subsurface sounding. PhD Thesis. – Moscow, 2010. – 131 p.
- Epov M.I., Mironov V.L., Muzalevsky K.V.** Ultra-wideband electromagnetic sounding of an oil and gas reservoir. – Publishing House of the SO RAN, Novosibirsk, 2011. – 114 p.
- Gazizov T.T.** Synthesis of optimal wired antennas. – Tomsk, 2013. – 120 p.
- Grinev A.Yu.** Issues of subsurface radar. – Radiotekhnika, Moscow, 2005. – 416 p.
- Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesensky A.S.** Theory and methods of ground penetrating radar: Textbook. – Publishing house "Mining book", Moscow, 2008. – 196 p.
- Jol H.M.** Ground penetrating radar: Theory and applications. – Elsevier, Amsterdam, 2009. – 543 p.
- Kurushin A.A.** The art of microwave design at CST STUDIO SUITE. – One Book, Moscow, 2014. – 434 p.
- Petrov B.M., Kostromitin G.I., Goremykin E.V.** Log-periodic vibrator antennas: Textbook for universities. – Hotline-Telecom, Moscow, 2005. – 239 p.
- Plasticov A.N.** Automation of the process of designing antennas and microwave devices in modern software systems for electrodynamic simulation. Part 2. Features of LPVA modeling in CST Microwave Studio // Modern Electronics. – 2012. – Vol. 4. – P. 52–56.
- Saarenketo T.** Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys. PhD Thesis, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu. – Acta Universitatis Ouluensis, 2006. – 121p.
- Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V., Sukhobok Yu.A.** Search for buried ice by georadar during the reconstruction of railways // Second International Symposium of Roadbed in Cold Regions (Novosibirsk, September 24–26, 2015): Symposium Proceedings. – Novosibirsk, 2015. – P. 78–84.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БУХТИЯРОВ Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: автоматизация проектирования антенно-фидерных устройств, разработка аппаратных средств для импульсных электромагнитных зондирований.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики, директор ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 2022 г.,
принята к публикации 12 декабря 2022 г.*