

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДАРА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Мельчинов В.П. ⁽¹⁾, Нерадовский Л.Г. ⁽²⁾, Аргунов Е.П. ⁽¹⁾

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

В работе приведены результаты радиолокационного зондирования водных акваторий и верхних слоев земли с помощью георадара ОКО. Проведена оценка диэлектрической проницаемости озерного и речного льда, полученные по измерениям на льду. По измерениям на воде определена диэлектрическая проницаемость озерной воды. Для многолетнемерзлых грунтов выполнены измерения с помощью георадара на типичных комплексах горных пород и грунтов. Одновременно были проведены измерения поверхностного импеданса с помощью аппаратуры ИПИ-1000. Показано, что георадарные данные о состоянии строения верхних слоев земли могут быть использованы для решения обратной задачи радиоэлектromагнитного зондирования.

Радиолокационное зондирование широко используется для решения задач подповерхностного картирования с целью определения толщины ледяного покрова; обследования водоемов, определения мощности слоя сезонного протаивания-промерзания, оконтуривания областей многолетней мерзлоты, таликов и т.д. Преимуществом этого метода при оценке толщины ледового покрова является мобильность и возможность установки на воздушное судно для быстрой съемки радарограмм на больших площадях. Измерения толщины льда позволяют оценить безопасность ледовых переправ и прогнозировать вероятность образования заторов льда при вскрытии рек. Обычно для этих целей используются антенные блоки с частотой 400 МГц и выше [1].

Наземная радиолокация с помощью георадара используется для определения глубины границ слоев с разными электрическими характеристиками. Георадар в условиях многолетней мерзлоты с успехом может использоваться для решения геолого-геофизических и инженерных задач: при картировании мерзлых рыхлых отложений и при изысканиях под строительство на многолетней мерзлоте [2].

В данной работе приведены результаты работ георадаром ОКО -2 с целью определения диэлектрической проницаемости льда и воды, которые влияют на точность определения толщины льда и глубины водоемов. В работе также сделана попытка использования георадарных данных для решения обратной задачи радиоэлектromагнитного зондирования в условиях многолетней мерзлоты.

Для резко континентального климата Якутии толщина ледового покрова на озерах и реках может достигать 2 и более метров, поэтому желательно перейти к более низким частотам. Измерения с помощью георадара с антенной АБ-250 были выполнены на озере Сайсар, расположенном в черте города. Проводимость воды в этом озере по лабораторным измерениям пробы воды составляет $1,05 \cdot 10^{-1}$ Сим/м. Хорошая проводимость воды обусловлена значительным содержанием примесей в ней. На рис.1. приведена радарограмма, полученная в марте месяце.

В левой части радарограммы четко прослеживается сигнал, отраженный от воды и двукратные отражения от границы воды и воздуха. Отражения от дна озера отсутствуют ввиду значительного затухания электромагнитных волн в соленой воде. При прохождении георадара над прорубью наблюдаются боковые отражения. Для оценки диэлектрической проницаемости льда нами была измерена толщина льда в проруби, над которой проходил профиль трассы.

Толщина льда, измеренная в проруби в момент проведения измерений, составила 120 см. По визирке на радарограмме были определены время распространения электромагнитного импульса в толще льда по результатам первого и второго отражения (переотражения). Скорость электромагнитной волны в толще льда в обоих случаях одинакова и составила около 18,1 см/нс,

что дает оценку в определении относительной диэлектрической проницаемости озерного льда $\epsilon = 2,8$.

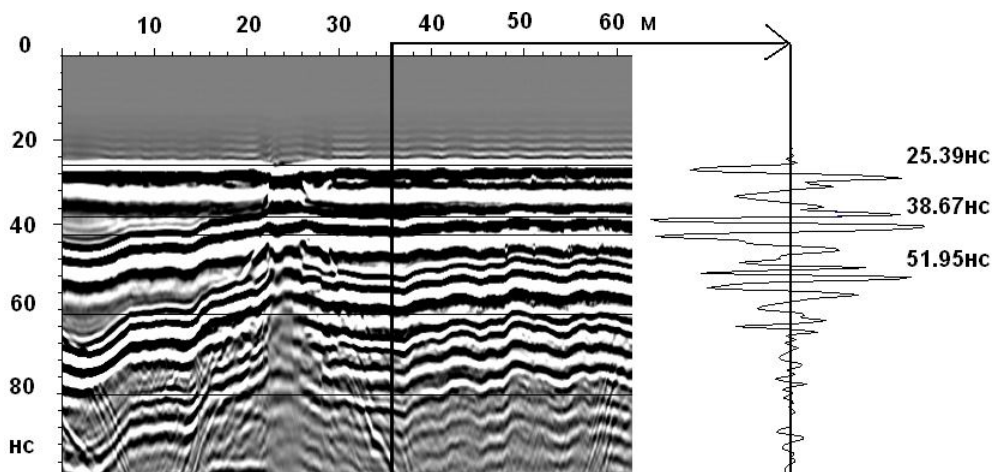


Рис.1. Радарограмма на соленом озере. Антенный блок АБ-250.

Радарограмма для речного льда приведена на рис.2. Проводимость речной воды по литературным данным составляет в среднем 0,2 - 10 мСим/м. Оказывается, что толщина льда не остается постоянной вдоль профиля, что характерно для водно-шугового льда [1]. Толщина снежного покрова на момент измерений составила свыше 40 см. Отражения от границы снег-лед также видны на радарограмме и накладываются на сигнал прямого прохождения, что ухудшает интерпретацию. С учетом толщины снежного покрова была определена диэлектрическая проницаемость водно-шугового льда. При этом получено значение относительной диэлектрической проницаемости льда 4, 2.

Полученные значения относительной диэлектрической проницаемости льда совпадают с литературными данными, полученными в широком диапазоне частот от десятков килогерц до сотен мегагерц.

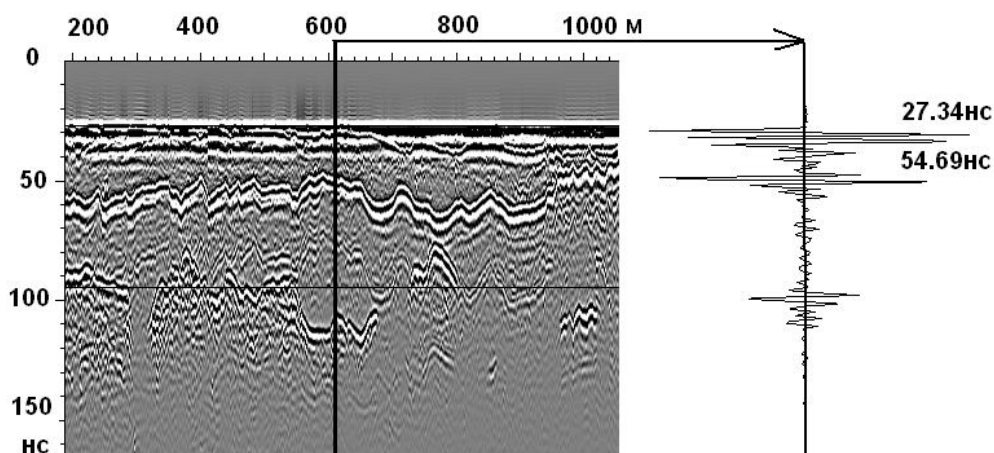


Рис. 2. Водно-шуговой лед на р. Лена. Антенный блок АБ-250.

В летнее время года были проведены измерения при установке георадара на дно резиновой лодки для определения диэлектрической проницаемости воды на пресных озерах долины р. Лены. На рис.3. приведен пример радарограммы на пресном озере около п. Капитоновка.

Для оценки диэлектрической проницаемости воды нами использовались данные о глубине озера. Глубина озера в контрольной точке оказалось равной 225 см. По полученной радарограмме, определялось время задержки зондирующего импульса и определялась скорость электромагнитного импульса в воде.

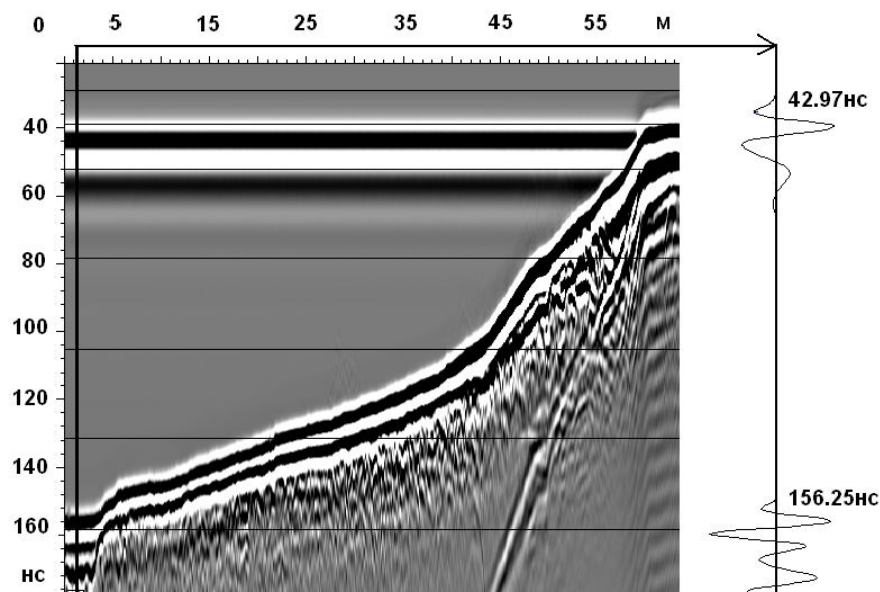


Рис.3. Радарограмма на пресном озере. Антенный блок АБ-250.

Из сравнения скорости электромагнитных волн в воде со скоростью света определена относительная диэлектрическая проницаемость воды - 57. Обычно ϵ воды всегда принимается равной 81, что может привести к ошибке в определении глубины водоемов.

Рассмотрим возможность использования георадара при решении обратной задачи радиоэлектромагнитного зондирования. Сущность метода радиоэлектромагнитного зондирования заключается в измерении поверхностного импеданса по сигналам радионавигационных и радиовещательных станций в СДВ-СВ диапазонах [3]. По частотной зависимости поверхностного импеданса можно восстановить параметры геоэлектрического разреза – мощность (h), сопротивление (ρ) и диэлектрическую проницаемость (ϵ) каждого слоя, из которых состоит данный геоэлектрический разрез [4]. Точность восстановления параметров геоэлектрического разреза зависит от начальных значений, т.е. априори должны быть известны приблизительные значения h_i , ρ_i , ϵ_i . С помощью георадара можно оценить мощности первых 2- 3 слоев, слагающих геоэлектрический разрез.

На рис.4 приведена радарограмма, полученная в долине р. Лены около п. Тулагино.

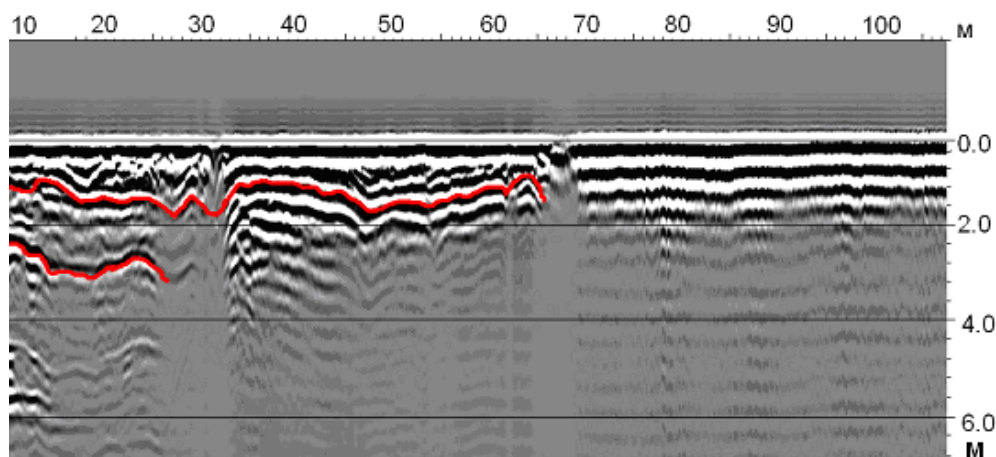


Рис. 4. Радарограмма в долине р. Лены.

Геологическое строение данной территории, в общем то известно, по результатам обследования скважин на разных участках долины реки. Сверху залегают супеси, далее по глубине залегают разнородные пески. Коренные породы, представленные песчаниками и

алевролитами залегают на глубине 15-25 м. Как видно из рис.4. в левой части радарограммы четко выделяются 2 границы. Первая граница-это граница сезонно-талого слоя на глубине 1,2 м, а вторая граница может быть границей между супесью и песками на глубине 3,2 м..

Начиная с расстояния 60 м, на радарограмме не выделяется ни одна граница. Этот участок профиля находится на пониженном участке рельефа и приурочен к залеганию солонцеватых почв. На этих двух разнородных участках были проведены измерения модуля и фазы поверхностного импеданса с помощью аппаратуры ИПИ-1000, разработанного в ИЗК ЛГУ [5]. Измерения поверхностного импеданса выполнены на 5 частотах в ДВ-СВ диапазонах на первом участке от 0-30 м и на втором участке от 70 до 100 м по профилю. По значениям модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ поверхностного импеданса были выполнены расчеты эффективного сопротивления подстилающей среды по формуле:

$$\rho_{эфф} = \frac{60\lambda}{|\delta|^2 \sin 2\varphi_\delta}.$$

Результаты расчетов эффективного сопротивления для двух участков приведены в таблице.

№	Частота кГц	1 участок	2 участок
		$\rho_{эфф}$, Ом	$\rho_{эфф}$, Ом
1	22,3	112	14
2	171	437	7
3	549	258	6
4	685	291	7
5	864	182	6

Как видно из таблицы, на возвышенном участке эффективное сопротивление подстилающей среды в десятки раз выше, чем на солонцеватом участке 2. Глубина зондирования на участке с большим сопротивлением оказалась выше, чем на втором участке профиля. На этом участке выделены две отражающие границы на глубине 1,2 м и 3,2 м. При решении обратной задачи, т.е. восстановлении параметров геоэлектрического разреза для первого участка были использованы фондовые и литературные данные вертикального электрического зондирования на постоянном токе на территории Якутии. Из этих материалов следует, что сопротивление коренных пород порядка 50-300 Ом, а сопротивление мерзлых рыхлых отложений порядка 5 000 – 20 000 Ом.

Для сужения области поиска неизвестных параметров геоэлектрического разреза были зафиксированы значения диэлектрической проницаемости каждого слоя и мощности первых двух слоев, полученные при интерпретации радарограммы. Диэлектрическая проницаемость каждого слоя принималась равной 5, а сопротивления первых двух слоев принимались такого же порядка, как эффективное сопротивление среды на высоких частотах согласно вышеприведенной таблице. Восстановленные значения параметров геоэлектрического разреза оказались следующими:

$$\rho_1= 48 \text{ Ом}, h_1=1,2 \text{ м}, \rho_2=800 \text{ Ом}, h_2=2 \text{ м}, \rho_3=6000 \text{ Ом}, h_3 =15 \text{ м}, \rho_4= 44 \text{ Ом}.$$

Согласно принципу эквивалентности для третьего слоя увеличение его мощности и одновременное уменьшение сопротивления не должно оказывать существенного влияния на значения модуля и фазы импеданса. Поэтому использование георадара с большей глубинностью оказалось бы весьма полезной при восстановлении параметров геоэлектрического многолетнемерзлых пород, поскольку с достаточной точностью была бы определена граница между мерзлыми рыхлыми отложениями и коренными мерзлыми породами с низким электрическим сопротивлением.

На рис.5 представлены теоретические и измеренные значения модуля и фазы поверхностного импеданса для 1 участка. Здесь треугольниками отмечены экспериментальные

значения модуля и фазы импеданса, а непрерывной линией - теоретические кривые модуля и фазы поверхностного импеданса, которые соответствуют восстановленным значениям параметров геоэлектрического разреза. При точном совпадении теоретической кривой с экспериментальными значениями модуля и фазы импеданса в принципе должны получиться реальные значения параметров геоэлектрического разреза.

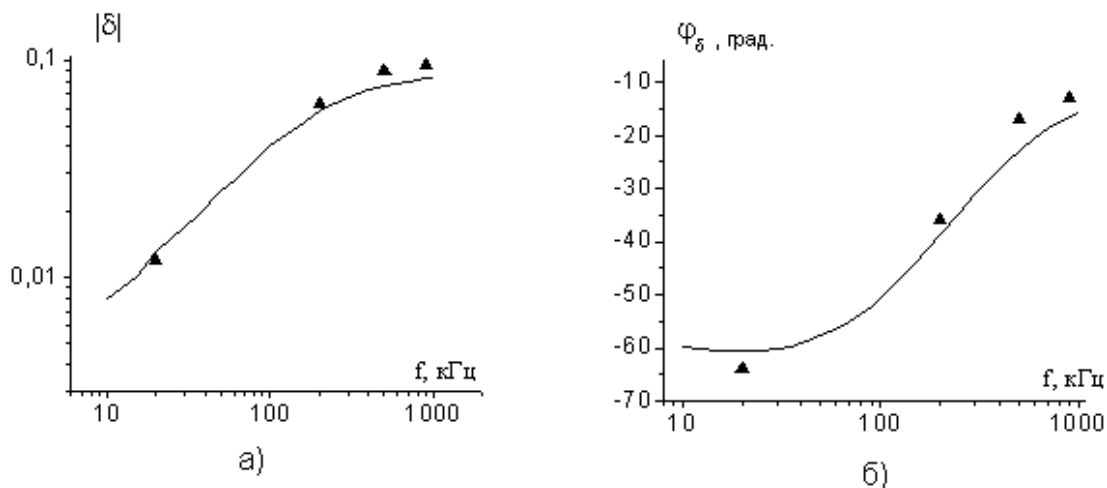


Рис.5. Теоретические и измеренные значения модуля (а) и фазы (б) поверхностного импеданса в долине р.Лена.

Результаты исследований показали, что метод георадара наиболее эффективен при работе на водных акваториях, как с поверхности льда, так и с поверхности воды. По известным значениям толщины льда и глубины водоема в контрольных точках можно определить диэлектрические проницаемости льда и воды, что позволяет уменьшить погрешность определения толщины льда и глубины водоема на других пунктах или профилях измерений.

Наземные георадарные измерения могут быть также использованы для решения обратной задачи метода радиоэлектromагнитного зондирования земли при условии достаточно низкой проводимости верхних слоев земной поверхности. На хорошо проводящих почвах применение георадара не дает информации о нижележащих границах слоев с разными электрическими свойствами ввиду малой глубины зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.geotech.ru/about/stati. (Семейкин Н.П., Монахов В.В., Зверев Е.О., Еременко А.В. Георадиолокационные исследования пресных речных льдов. Измерение толщины льда)
2. А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 136 с.
3. А.В. Вешев., В.Г. Ивочкин, М.И. Пертель Аппаратура для метода радиоэлектromагнитного профилирования // Геофизическая аппаратура. Недрa, Л: 1972 Вып. 49. с. 34-38.
4. Л.Х. Ангархаева, Ю.Б. Башкуев, В.П. Мельчинов Обратная задача для слоистой импедансной среды. Радиотехника и электроника. 1997. Том 42., №10. С.1169-1173.
5. П. А. Парфентьев, М.И. Пертель Измеритель поверхностного импеданса на СДВ-СВ диапазоны. // Низкочастотный волновод «Земля - ионосфера».- Алма -Ата, Гылым. 1991. с. 133-135.