

**GEOELECTRICAL SECTION OF THE BARGUZIN BAY OF LAKE BAIKAL
ACCORDING TO GEORADAR AND RADIO IMPEDANCE SOUNDING DATA****Yu.B. Bashkuev**  , **V.B. Khaptanov** , **M.G. Dembelov** 

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Buryatia, Russia

ABSTRACT. Electrical resistivity (electrical conductivity) of water and bottom soil of the Barguzin Bay was studied by radio impedance soundings in VLF/LF bands, and the measurements were analysed. The georadar sounding method was used to investigate dielectric permittivity of freshwater ice (dielectric constant is $\epsilon=3.4$). We developed the technique of radio impedance sounding from the ice surface of Lake Baikal for measuring the electrical resistance of bottom soil in the water area, and applied this technique to a layered model of a medium with a base showing poor/good conductivity. Geoelectric models were constructed for the Barguzin Bay coast and the southern Lake Baikal. The geoelectrical section (GES) of the water area can be useful for earthquake forecasting from electromagnetic data, as well as for analysing the physical and chemical causes of the occurrence of ring structures on the ice surface of Lake Baikal.

KEYWORDS: GPR; radio impedance sounding; geoelectrical section (GES); Lake Baikal; Barguzin Bay

FUNDING: The study was carried out under the State Budget Project 0336-2019-0006 – Propagation of Radio Waves in Inhomogeneous Impedance Channels, with a partial financial support from RFBR (project 18-47-030006).

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Yuriy B. Bashkuev, buddich@mail.ru

Received: February 21, 2020

Revised: September 21, 2020

Accepted: October 14, 2020

FOR CITATION: Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., 2020. Geoelectrical section of the Barguzin Bay of Lake Baikal according to georadar and radio impedance sounding data. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (4), 806–816. doi:10.5800/GT-2020-11-4-0508

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ БАРГУЗИНСКОГО ЗАЛИВА НА ОЗ. БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДАРНЫХ И РАДИОИМПЕДАНСНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов, М.Г. Дембелов

Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. Методом радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах измерено удельное электрическое сопротивление (электропроводимость) воды и донного грунта Баргузинского залива. Методом георадарного зондирования определена диэлектрическая проницаемость пресноводного льда $\epsilon=3.4$. Разработана методика радиоимпедансного зондирования с ледяной поверхности оз. Байкал для измерения электрического сопротивления донного грунта акватории в рамках слоистой модели среды с плохо и хорошо проводящим основанием. Созданы геоэлектрические модели прибрежной зоны Баргузинского залива и южной части акватории оз. Байкал. Информация о геоэлектрическом разрезе акватории может быть использована в электромагнитном прогнозе землетрясений, а также при анализе физико-химических причин появления кольцевых структур на ледяной поверхности оз. Байкал.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: георадиолокация; радиоимпедансное зондирование; геоэлектрический разрез; озеро Байкал; Баргузинский залив

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена по госбюджетному проекту 0336-2019-0006 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» и частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-47-030006).

1. ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал является уникальным объектом для физических исследований. Здесь в течение многих лет работает большой комплекс физических инструментов, принадлежащих институтам РАН (ИСЗФ СО РАН, ИЗК СО РАН, ГИН СО РАН, ИЯИ РАН, ЛИН СО РАН, ИОА СО РАН) [Afraimovich et al., 2012]. При исследованиях различных физико-химических процессов в геосферах Земли получены ценные материалы. В озере Байкал впервые в мире выполнен (и продолжает вестись) многолетний глубоководный эксперимент по измерению вертикальной компоненты электрического поля E_z на базе «поверхность – дно». Электромагнитные исследования проведены в районе глубоководной Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с помощью размещенной на притопленной буйковой станции измерительной системы. Результаты опубликованы (например [Budnev, 2011; Korotaev et al., 2015; Shneer et al., 2007]). Имеется большое количество публикаций Лимнологического института СО РАН и Института оптики атмосферы СО РАН по тепловому режиму, ледовому покрову, течениям, метеорологии и ветровым явлениям на оз. Байкал. Однако электрические свойства льда, воды и донного грунта в работах ЛИН СО РАН и ИОА СО РАН практически не рассматривались. Ценные данные получены Институтом океанологии РАН в 2008–2010 гг. во время экспедиции «Миры на Байкале». Определены температурные зависимости воды от поверхности до дна озера, а также содержание кислорода. К сожалению, данные по электропроводности байкальской воды не получены, так как кондуктометры на глубоководных аппаратах «Мир» были предназначены для измерения морской воды. Обзор литературы

показал, что в радиогеофизической литературе электрические характеристики крупных заливов на оз. Байкал не описаны.

Цель исследования – по результатам измерений георадарным и радиоимпедансным методом определить электрофизические и геометрические характеристики подстилающей среды «лед – вода – донный грунт» Баргузинского залива на оз. Байкал. Материалы статьи дополняют банк данных по электрическим свойствам оз. Байкал [Afraimovich et al., 2012; Bashkuev et al., 1993; Bashkuev, 1996; Mel'chinov et al., 2006]. До этого исследования авторы работы имели опыт изучения ледяного покрова оз. Байкал георадаром «ОКО-2» [ОКО-2 Radio-Technical Device..., 2006; GeoScan32, 2013] с бортовой катера на воздушной подушке «Хивус» в районе дельты Селенги [Tulokhonov et al., 2018].

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения проведены комплексом радиоволновых методов георадарного и радиоимпедансного зондирования. Общая длина георадарного профиля составила 30 км. Поверхностный импеданс измерен в 52 пунктах наблюдения методом радиоимпедансного зондирования. Важной целью аквальных исследований являлось также обоснование применимости метода радиоимпедансных зондирований (РИЗ) для определения электрических и геотехнических параметров донного грунта в прибрежной зоне акватории. Для зондирований использованы вертикально поляризованные поля радиостанций с несущими частотами 22.2, 50, 198, 234, 279 кГц. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) проб воды определялась RLC-метром AM 3003 с датчиком УК-0.2/1 от

кондуктометра ММЗЧ-0.4. Глубина воды определялась лотом на 19 скважинах. Толщина льда измерена с погрешностью 1–2 см.

2.1. Радиоимпедансное зондирование

Цель радиоимпедансных зондирований заключалась в определении поверхностного импеданса δ и геоэлектрического строения структуры «лед – вода – донный грунт» на радиочастотах СДВ-ДВ диапазонов. Эти данные необходимы для определения параметров геоэлектрического разреза акватории, а также для оценки точности расчетов распространения СДВ-ДВ-СВ электромагнитных волн над акваторией по локальным электрическим характеристикам криогенной подстилающей среды «лед – пресная вода».

В пункте наблюдения (на i -ом пикете) измеряется приведенный поверхностный импеданс:

$$\delta = E_{\tau} / (H_{\tau} \cdot Z_0),$$

где E_{τ} и H_{τ} – тангенциальные компоненты электрического и магнитного полей на границе раздела «воздух – подстилающая среда», Z_0 – импеданс свободного пространства, равный 376.6 Ом [Bashkuev, 1996; Bashkuev et al., 2017; Efremov, 2013; Mel'chinov et al., 2006; Tezkan, Saraev, 2008].

Поверхностный импеданс есть комплексное число, которое можно представить в алгебраической форме $\delta = \text{Re}\delta - i\text{Im}\delta$ или показательной форме $\delta = |\delta|e^{i\varphi_{\delta}}$. В статье

используется показательная форма представления импеданса, то есть на пикете измеряется модуль $|\delta|$ и фаза φ_{δ} импеданса на четырех – восьми частотах действующих радиостанций. Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость однородной среды $\epsilon_k = \epsilon + i60\lambda\sigma$ определяет ее электрические свойства. Здесь ϵ есть ее диэлектрическая проницаемость, а σ – электропроводимость среды; λ – длина радиоволны. Мнимая часть $\epsilon_k = \epsilon + i60\lambda\sigma$ описывает токи электропроводимости, а действительная часть ϵ – токи смещения в среде. В СДВ-ДВ диапазонах токи электропроводимости во много раз превышают токи смещения. В этом случае глубина проникновения радиополя (скин-слой) определяется по формуле:

$$h = \sqrt{2 / (\omega\mu_0\sigma)}.$$

Скин-слой зависит от электропроводимости среды σ и частоты ω . Рассмотрим характерный для оз. Байкал пример. На частоте 10 кГц и электропроводимости воды $\sigma = 10^{-2}$ См/м (удельное электрическое сопротивление 100 Ом·м) скин-слой будет равен 50.3 м, а на частоте 300 кГц он уменьшится до 9.2 м. Глубина проникновения радиоволны в среду существенно зависит от частоты. На скин-эффекте основан метод радиоволнового зондирования слоистых сред. Он позволяет определять строение среды и ее электрические свойства на разных глубинах. Электропроводимость σ_i , диэлектрическая проницаемость ϵ_i и мощность h_i каждого i -го слоя

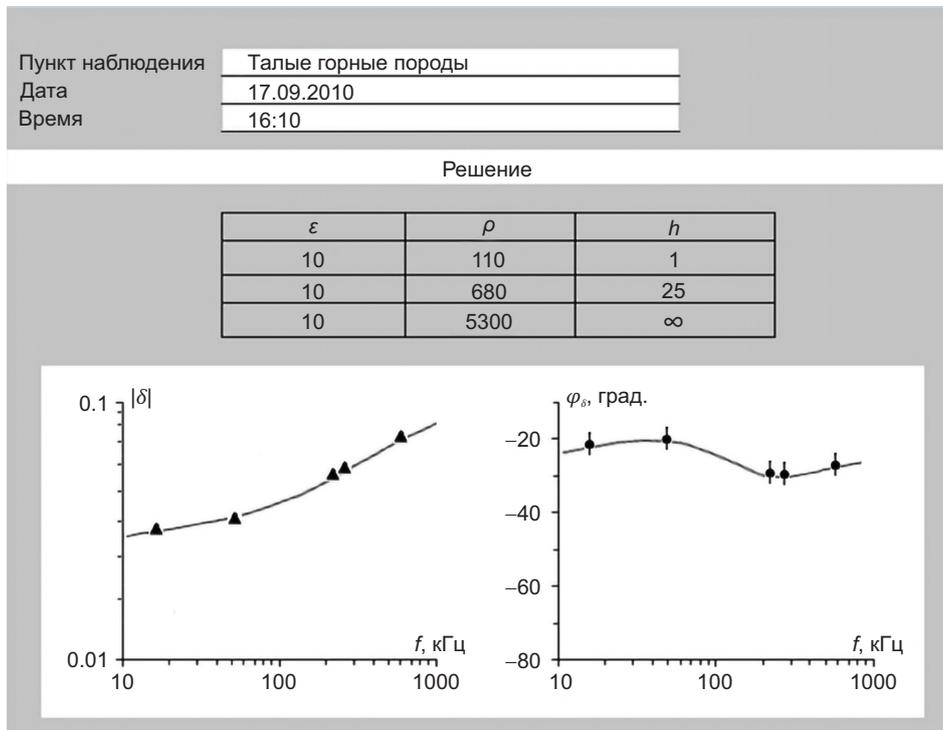


Рис. 1. Результаты измерений модуля и фазы импеданса на пяти частотах для талых горных пород и электрические параметры восстановленного геоэлектрического разреза. Точки и треугольники – измеренные значения. Сплошные линии – импеданс для полученного решения.

Fig. 1. Measured modules and impedance phases at five frequencies for thawed rocks, and electrical parameters of the reconstructed geoelectrical section. Points and triangles mark measured values. Solid lines show the impedance for the resultant solution.

определялись по измеренной частотной зависимости модуля и фазы импеданса при решении обратной задачи методом регуляризации А.Н. Тихонова для 2–4-слойной модели геоэлектрического разреза [Angarkhaeva, 2002; Mel'chinov et al., 2006]. Измерения импеданса проведены микровольтметром-фазометром ИПИ-300. Погрешность измерений модуля импеданса не превышала ±5 %, а фазы импеданса ±(1–2°). Магнитное поле H_τ измерялось чувствительной экранированной магнитной рамкой, а электрическое поле E_τ – незаземленным приемным диполем длиной 20 м. На рис. 1 представлен результат интерпретации частотной зависимости поверхностного импеданса на пяти частотах СДВ-ДВ диапазонов для талых горных пород.

2.2. Георадарное зондирование

Для целей георадиолокации применялся георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1700 с центральной частотой зондирования 1700 МГц [ОКО-2 Radio-Technical Device..., 2006; Vladov, Starovoitov, 2004; Semeikin et al., 2005] (рис. 2). Георадар излучает периодическую последовательность широкополосных радиоимпульсов с центральной частотой спектра 1700 МГц. Он принимает отраженные сигналы от неоднородностей среды и границ раздела слоев с различными электрическими свойствами [ОКО-2 Radio-Technical Device..., 2006; Vladov, Starovoitov, 2004; Semeikin et al., 2005; Jol, 2009]. Глубина зондирования георадара «ОКО-2» с блоком АБ-1700 составляет 1 м, разрешающая способность по глубине 0.03 м (для сред с затуханием 1–2 дБ/м). Протяженность съемки составляла от 0.1 до 30.0 км. Экран монитора показывает радарограмму, определяющую слоистую структуру среды [GeoScan 32, 2013].

3. ГЕОРАДАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА БАРГУЗИНСКОГО ЗАЛИВА

На рис. 3 представлен 30-километровый маршрут георадарных измерений ледяного покрова Баргузинского залива на фрагменте спутникового снимка ледовой обстановки от 06.03.2018 г. Начало профиля – в районе пос. Максимиха, конец – у мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос. Измерения проведены 16–18 марта 2018 г.

Антенный блок АБ-1700 был закреплен на диэлектрической балке длиной 2 м на высоте 0.35 м от ледяной поверхности на автомобиле УАЗ-452. Толщина льда на маршруте профиля в основном составляла около 0.9 м, увеличиваясь до 0.95–1.00 м на мелководных участках вблизи южного и северного берега залива (рис. 4). В местах интенсивного торошения толщина льда увеличивалась до 1.2–1.4 м (рис. 5, а), есть небольшие участки уменьшения толщины льда до 0.5–0.6 м (рис. 5, б). На профиле была пробурена скважина для определения толщины льда и его диэлектрической проницаемости. Калибровочное зондирование льда с бурением скважины дало диэлектрическую проницаемость льда:

$$\epsilon = \left(\frac{c\Delta T}{2h} \right)^2 = 3.4,$$

где $c=0.3$ м/нс – скорость света, $h=0.9$ м – толщина льда, $\Delta T=11.06$ нс – время прохождения зондирующего импульса от верхней до нижней кромки льда и обратно. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) льда составляет 100–200 тыс. Ом·м. На частоте 1700 МГц пресноводный лед представляет собой диэлектрическую среду с малыми потерями. Точное значение УЭС льда прямыми измерениями пока не определено. Разработка

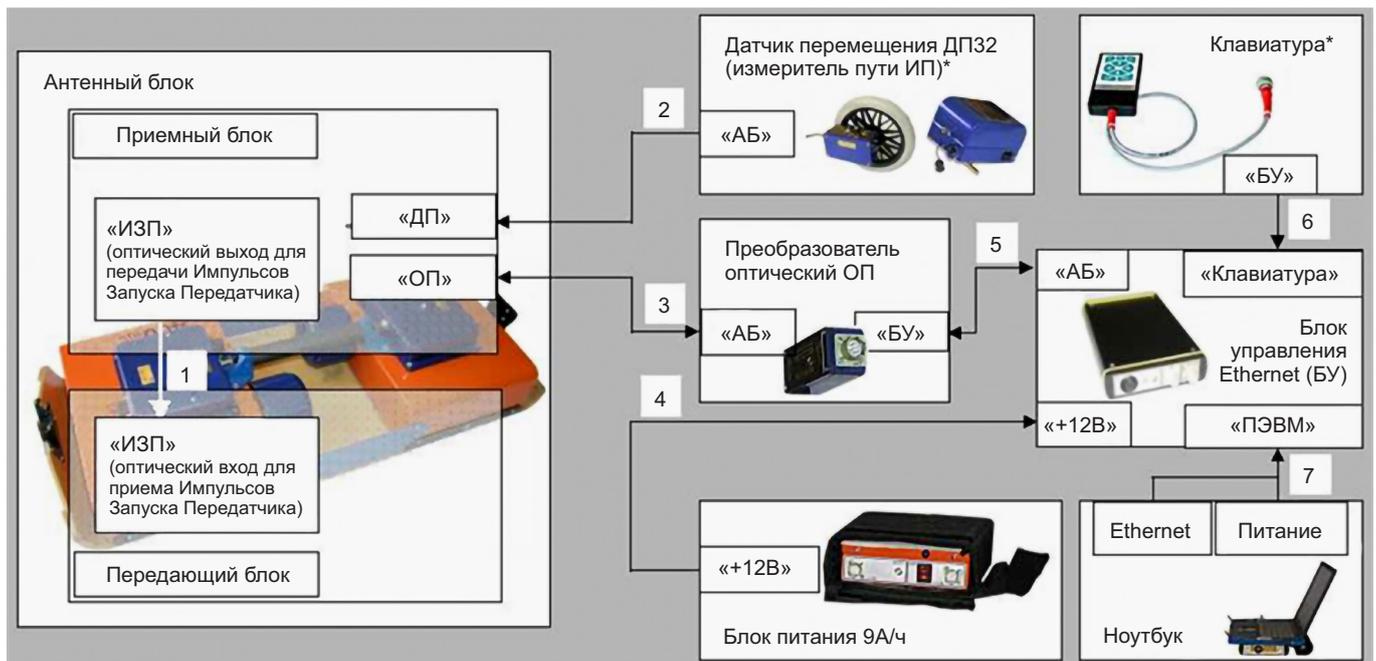


Рис. 2. Функциональная схема георадара «ОКО-2» с ПЭВМ.
 Fig. 2. Block diagram of a OKO-2 GPR unit and a computer.

метода измерений УЭС пресноводного льда представляет новую актуальную задачу. Концентрация солей в ледяном покрове озера изменяется от 18 до 2.5 мг/л (при минерализации воды 120 мг/л). В конце зимы при толщине льда около 1 м распределение концентрации солей по высоте имеет минимум 2.5 мг/л в центральной

и нижней части керна. Верхний слой 0–4 см имеет концентрацию 18 мг/л (для сравнения дистиллированная вода имеет концентрацию 10 мг/л и УЭС 2540 Ом·м). УЭС воды из керна льда при температуре 2 °С изменяется от 1600 до 8700 Ом·м в слое 40–50 см. Верхний предел значительно выше УЭС бидистиллированной воды

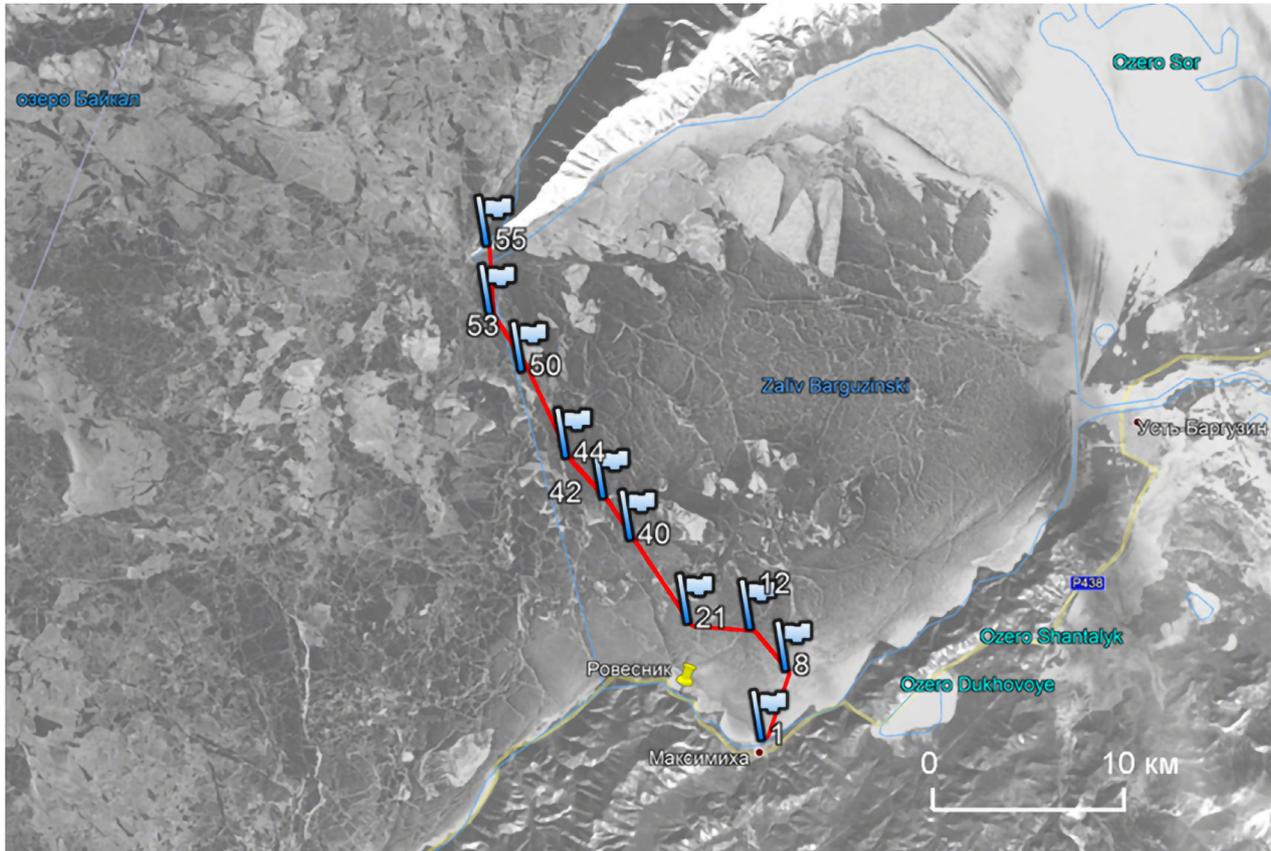


Рис. 3. Схема георадарного профиля через Баргузинский залив. Маршрут нанесен на спутниковый снимок ледовой обстановки 06.03.2018 г.

Fig. 3. Georadar profile across the Barguzin Bay. The route is plotted on a satellite image showing the ice conditions on March 6, 2018.

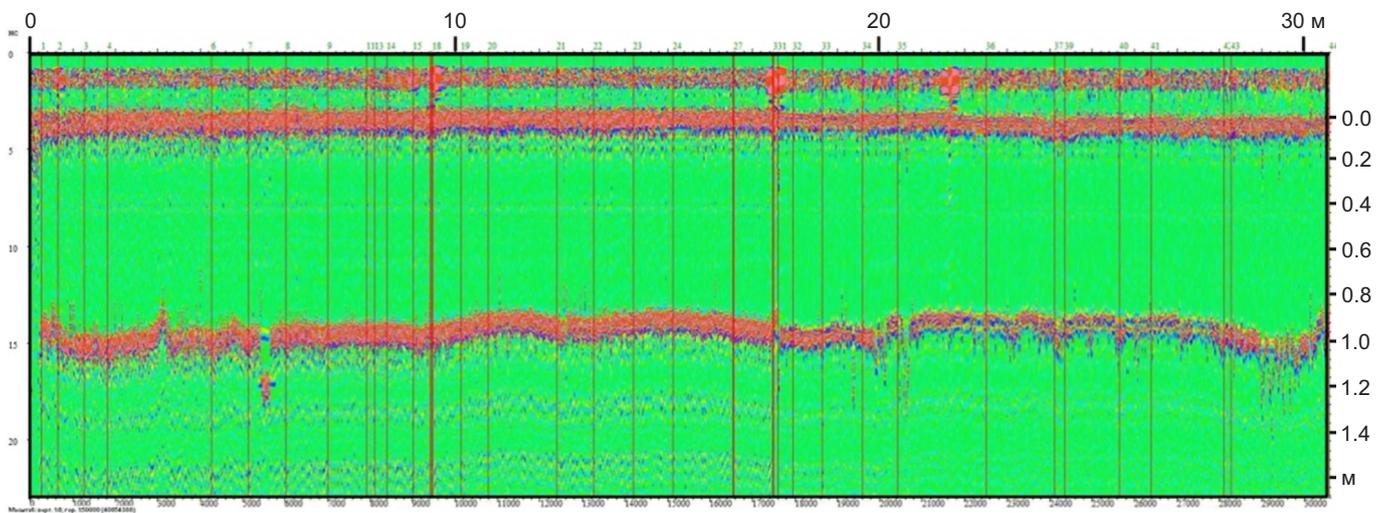


Рис. 4. Радарограмма толщины ледяного покрова на 30-километровом профиле через Баргузинский залив.

Fig. 4. Radargram of the ice cover thickness at the 30-km profile across the Barguzin Bay.

(4380 Ом·м). Следовательно, вода из байкальского льда почти не имеет примесей и близка по свойствам к бидистиллированной воде. УЭС байкальской воды при температуре 2 °С составляет примерно 130–150 Ом·м.

На ледяной поверхности залива часто встречаются трещины, которые называют «становыми» трещинами, или щелями. На рис. 6 приведена радарограмма льда в районе такой «становой» трещины (рис. 6, а) и радарограмма, проходящая через калибровочную скважину (рис. 6, б). В обоих случаях зафиксировано отсутствие отражения от нижней кромки льда.

4. АНАЛИЗ РАДИОИМПЕДАНСНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Радиогеофизическая задача определения геоэлектрического разреза прибрежной зоны Баргузинского залива решалась на основе анализа амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля в 33 пунктах наблюдения по данным метода радиоимпедансного зондирования [Angarkhaeva, 2002]. Во время измерений применялись электромагнитные поля СДВ-ДВ радиостанций с достаточно высокими уровнями сигналов и стабильным режимом работы. Для решения обратной

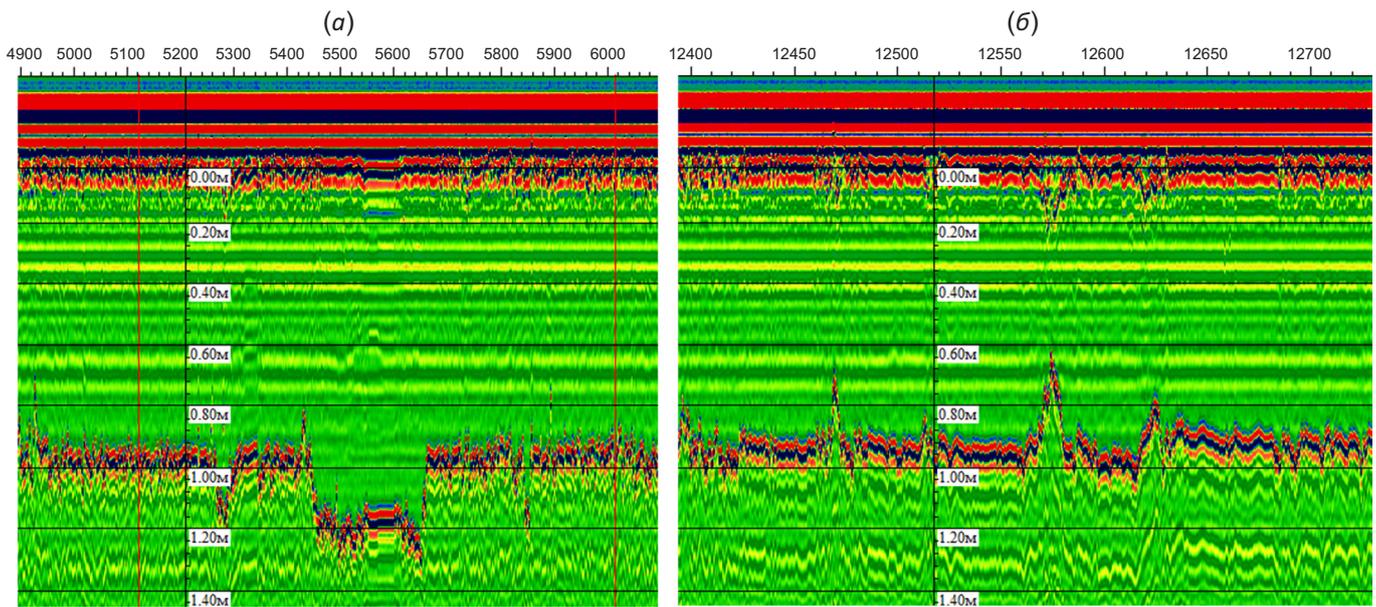


Рис. 5. Изменение толщины льда: (а) – увеличение до значений 1.2–1.4 м на фрагменте радарограммы 30-километрового профиля через Баргузинский залив; (б) – уменьшение до значений 0.5–0.6 м на фрагменте радарограммы 30-километрового профиля через Баргузинский залив.

Fig. 5. Variations of the ice cover thickness on different fragments of the 30-km profile radargram across the Barguzin Bay: (а) – increase to 1.2–1.4 m; (б) – decrease to 0.5–0.6 m.

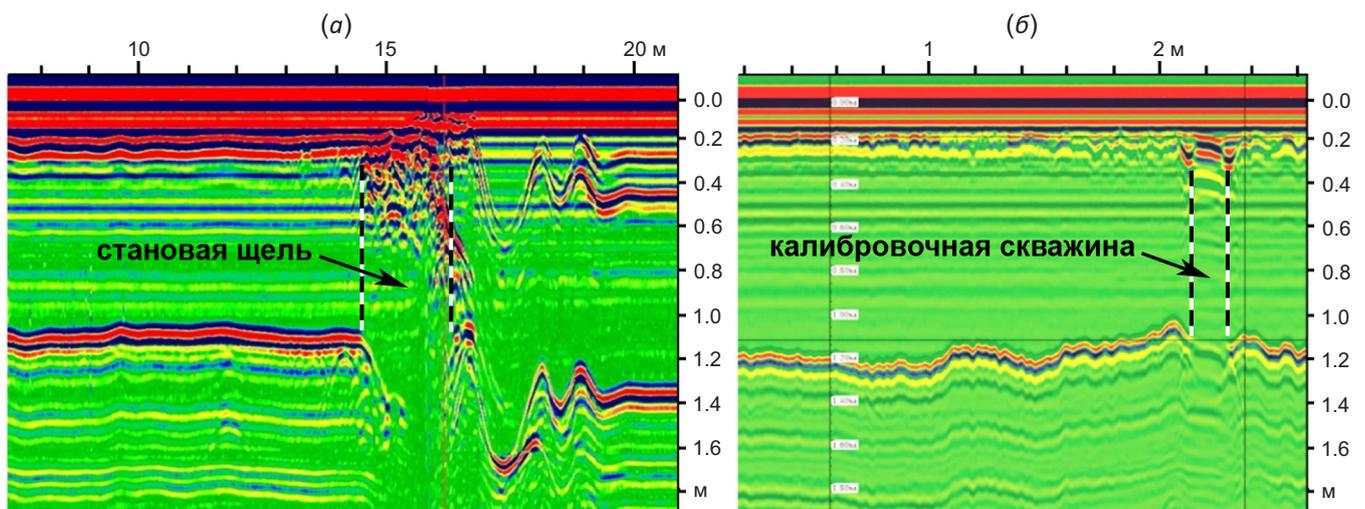


Рис. 6. Радарограммы Байкальского льда: (а) – радарограмма «становой» щели; (б) – радарограмма через калибровочную скважину.

Fig. 6. Radargrams of Baikal ice: (а) – "dead slit" (fracture in ice which forms from year to year in the same place); (б) – calibration well.

задачи электромагнитного зондирования слоистой полупроводящей среды использован метод регуляризации на основе гипотетического разреза [Angarkhaeva, 2002]. Толщина льда, УЭС и глубина слоя воды определены по результатам бурения на рассмотренных профилях от 10 до 19 скважин.

Геoeлектрические разрезы прибрежной части Баргузинского залива на глубину до 100 м построены для двух профилей:

а) Баргузинский залив, профиль «мыс Нижнее Изголовье – полуостров Святой Нос» (рис. 7);

б) Баргузинский залив, профиль «Максимиha» (рис. 8).

Рассмотрим измерения в районе мыса Нижнее Изголовье на полуострове Святой Нос. Анализ частотных зависимостей модуля и фазы импеданса в 17 пунктах профиля показал, что измерениям соответствует трехслойная модельная среда «лед – вода – донный грунт». Для определения сопротивления донного грунта электрические и геометрические характеристики льда и воды приняты следующими: $\epsilon_{\text{л}}=3.2$; $\rho_{\text{л}}=10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $h_{\text{л}}=0.8 \text{ м}$;

$\epsilon_{\text{в}}=87$; $h_{\text{в}}=1.2\text{--}78 \text{ м}$. УЭС воды выбиралось по измеренным пробам воды в каждом пункте. По результатам расчетов диэлектрическая проницаемость ϵ обводненного донного грунта определена равной 30. По этим исходным данным определено сопротивление донного грунта на глубинах от 1.2 до 78.0 м.

Донные отложения представлены глыбово-валунно-галечниковыми отложениями с УЭС от 530 до 980 Ом·м. УЭС воды изменяется от 127 до 146 Ом·м. Вблизи крутого берега ($\approx 780 \text{ м}$ профиля) донный грунт каменистый, геoeлектрический разрез типа $\rho_{\text{воды}} < \rho_{\text{дна}}$. Таким образом, геoeлектрический разрез прибрежной зоны в районе мыса Нижнее Изголовье (см. рис. 7) определен как трехслойный типа $\rho_{\text{льда}} > \rho_{\text{воды}} < \rho_{\text{дна}}$ до расстояния не более 1 км от берега. Склоны западной части акватории и полуострова Святой Нос значительно круче, чем восточные склоны акватории, что сказывается на типе геoeлектрического разреза прибрежной части озера.

Для Баргузинского залива в районе п. Максимиha (рис. 8) получен иной тип геoeлектрического разреза.

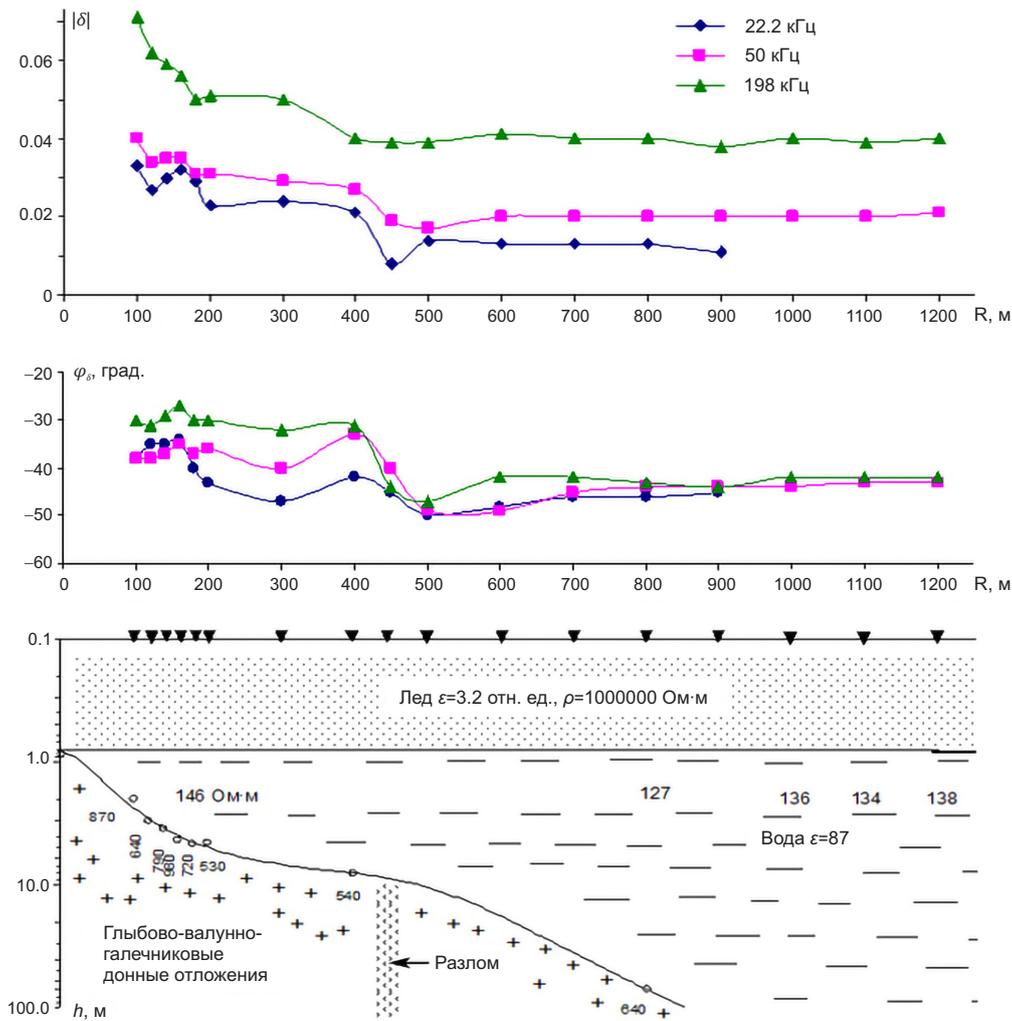


Рис. 7. Результаты измерений модуля и фазы импеданса на трех частотах для 17 пикетов на профиле «мыс Нижнее Изголовье – полуостров Святой Нос» и восстановленный геoeлектрический разрез.

Fig. 7. Measured modules and impedance phases at three frequencies for 17 pickets on the profile from Cape Nizhnee Izgolovie to Svyatoy Nos Peninsula, and the reconstructed geoelectrical section.

Сопrotивление донного грунта на данном профиле существенно ниже и изменяется в пределах от 31 до 105 Ом·м. Донный грунт представлен мелкозернистыми алевритовыми илами с редкими прослоями валуно-галечниковых отложений. Типичный геoeлектрический разрез прибрежной зоны в районе п. Максимиха (рис. 8) определен как трехслойный типа $\rho_{\text{льда}} > \rho_{\text{воды}} < \rho_{\text{дна}}$. Такому типу геoeлектрического разреза соответствует импедансная слоистая структура сильноиндуктивного типа. Так, на частоте 50 кГц фаза импеданса φ_{δ} на 15 пикетах (кроме ПК1 и ПК2) меньше -45° .

Для сравнения на рис. 9 представлен геoeлектрический разрез, полученный на Южном Байкале в районе п. Боярск. Здесь на профиле длиной более 4 км проведены зондирования на 18 пикетах. УЭС воды изменяется от 133 до 146 Ом·м, в среднем 140 Ом·м. Донные отложения образуют слоистую структуру «песчаные отложения, подстилаемые тонкозернистыми алевритовыми илами». УЭС песчаных отложений изменяется от 74 до 166 Ом·м, а алевритовых илов – от 11 до 23 Ом·м. На данном профиле удалось при фиксированных значениях

толщины льда, УЭС воды и ее глубины расчленить донную структуру на два слоя и определить их параметры. Толщина слоя песчаных отложений изменяется от 5.0 до 1.5 м. Геoeлектрический разрез на данном профиле относится к типу $\rho_{\text{льда}} > \rho_{\text{воды}} > \rho_{\text{дна}}$. Такому типу геoeлектрического разреза соответствует импедансная слоистая структура сильноиндуктивного типа. На частоте СДВ диапазона 22.2 кГц фаза импеданса φ_{δ} на всех пикетах меньше -45° со средним значением -60° . При толщине воды больше скин-слоя фаза импеданса φ_{δ} на всех частотах измерений асимптотически приближается к -45° .

В СДВ-ДВ-СВ диапазонах в зимнее время акваторию следует рассматривать как слоистую среду «снег – лед – вода – донные отложения». Слой льда оказывает существенное влияние на величину поверхностного импеданса акватории во всем радиодиапазоне. Необходимо провести сравнительные исследования электрических свойств пресноводного и морского льда и оценить их влияние на распространение СДВ-ДВ-СВ-КВ и УКВ радиоволн. По данным радиоимпедансных измерений

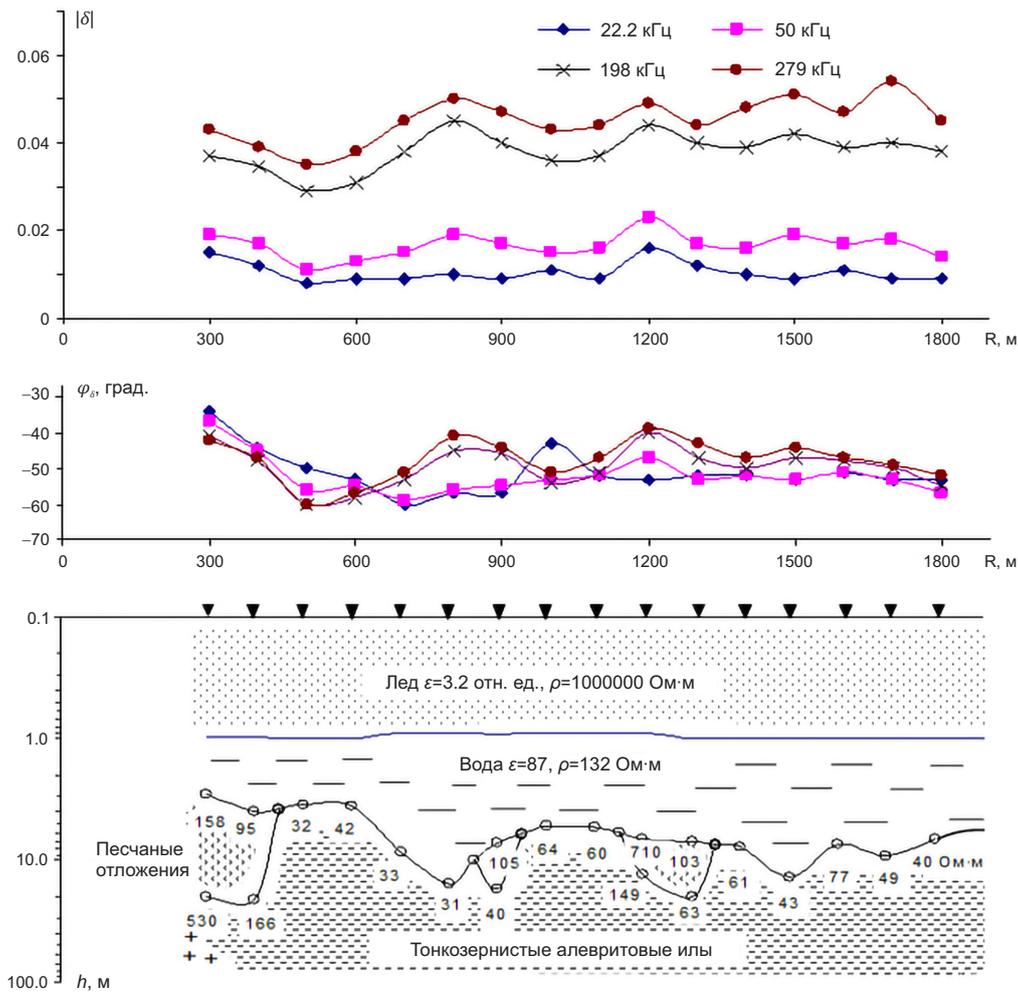


Рис. 8. Результаты измерений модуля и фазы импеданса на четырех частотах для 16 пикетов на профиле «Максимиха» и восстановленный геoeлектрический разрез.

Fig. 8. Measured modules and impedance phases at four frequencies for 16 pickets on the Maksimikha profile, and the reconstructed geoelectrical section.

зимой и летом установлена резкая смена типа импедансной структуры (слабоиндуктивная – сильноиндуктивная – слабоиндуктивная) при удалении от береговой линии до расстояния 5–6 км. При расчетах электромагнитных полей ДВ-СВ-КВ-УКВ диапазонов этот эффект

следует учитывать, в частности при определении ошибок «береговой» рефракции (изменение направления прихода фронта волны).

Результаты близких по измерениям радиоимпедансных зондирований акватории оз. Байкал в районах

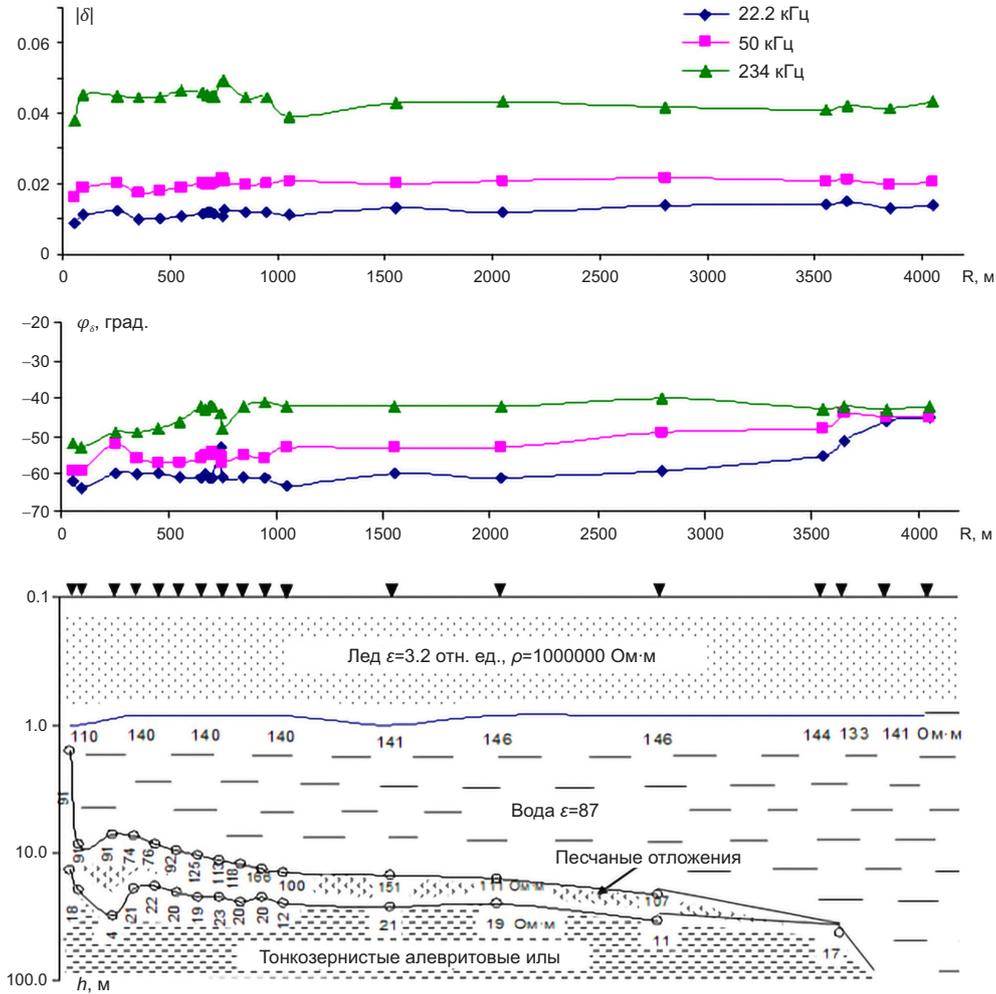


Рис. 9. Результаты измерений модуля и фазы импеданса на трех частотах для 18 пикетов на профиле «Южный Байкал» и восстановленный геоэлектрический разрез.

Fig. 9. Measured modules and impedance phases at three frequencies for 18 pickets on the South Baikal profile, and the reconstructed geoelectrical section.

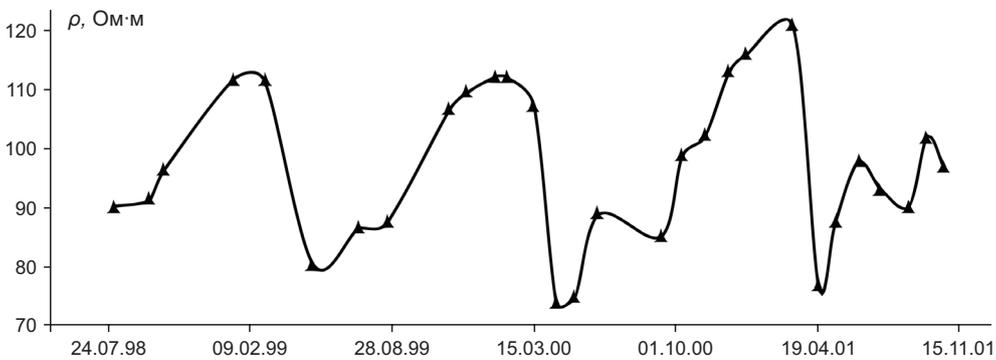


Рис. 10. Сезонные вариации УЭС воды р. Селенги в районе г. Улан-Удэ, приведенные к температуре 15 °С.

Fig. 10. Seasonal variations of electrical resistivity of water in the Selenga River near the city of Ulan-Ude. The data were normalized to a temperature of 15°C.

п. Турка и п. Горячинск и данные их интерпретаций приведены в работах [Bashkuev et al., 1993, 2006]. УЭС проб воды, взятых в местах зондирования прибрежной части Байкала, изменяется от 125 до 150 Ом·м. По данным National Research Council [Ireland, 1961], Великие озера имеют следующие УЭС: Онтарио – 67 Ом·м, Эри – 100 Ом·м, Супериор – 125 Ом·м, Гурон – 100 Ом·м, другие озера Канады – 100 Ом·м. Результаты определения УЭС проб воды, взятых в различных частях оз. Байкал, указывают на неоднородное распределение УЭС по прибрежной части акватории из-за различной минерализации и температуры воды. Особенно это заметно в местах впадения крупных рек и в заливах за счет смешивания вод с различной электропроводимостью. Наиболее крупная питающая оз. Байкал р. Селенга имеет более низкое УЭС (~70 Ом·м), чем байкальская вода. На рис. 10 представлены результаты измерений УЭС проб воды из р. Селенга в районе речного порта г. Улан-Удэ за период с 24 июля 1999 г. по 5 ноября 2001 г. (3 года и 3 месяца). Установлен устойчивый сезонный ход УЭС. Максимум отмечен зимой, а минимум – весной, в апреле и начале мая. Летом УЭС воды растет относительно весны и находится в интервале 85–90 Ом·м. Зимние уровни выше летних на 20–25 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах радиоволн измерено удельное электрическое сопротивление (электропроводимость) воды и донного грунта Баргузинского залива. Методом георадарного зондирования определена диэлектрическая проницаемость пресноводного льда $\epsilon=3.4$. Разработана методика радиоимпедансного зондирования с ледяной поверхности оз. Байкал для измерения электрического сопротивления донного грунта акватории в рамках слоистой модели среды с плохо и хорошо проводящим основанием. Созданы геоэлектрические модели прибрежной зоны Баргузинского залива и южной части акватории оз. Байкал. Информация о геоэлектрическом разрезе акватории может быть использована в электромагнитном прогнозе землетрясений [Balkhanov, Bashkuev, 2011], а также при анализе физико-химических причин появления кольцевых структур на ледяной поверхности оз. Байкал [Balkhanov et al., 2010; Balkhanov, Bashkuev, 2013].

6. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Afraimovich E.L., Zherebtsov G.A., Perevalova N.P., Sanokov V.A., Bashkuev Yu.B., Kurkin V.I., Kovalenko V.A., Rakhmatulin R.A., Mikhalev A.V., Bergardt O.I. et al., 2012. Seismionospheric and Seismoelectromagnetic Processes in the Baikal Rift Zone. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 304 p. (in Russian) [Афраимович Э.Л., Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П., Саньков В.А., Башкуев Ю.Б., Куркин В.И., Коваленко В.А., Рахматулин Р.А., Михалев А.В., Бергардт О.И. и др. Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.].

Angarkhaeva L.Kh., 2002. The Impedance Software Package for Solving Problems of Radio Impedance Sounding. Certificate of Official Registration of Computer Program № 2002610893 Dated June 06, 2002. The Impedance Software Package for Solving Problems of Radio Impedance Sounding. RO SPATENT, Moscow (in Russian) [Ангархаева Л.Х. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610893 от 06.06.2002. М.: РОСПАТЕНТ, 2002].

Balkhanov V.K., Bashkuev Y.B., 2011. Way of Detecting an Electromagnetic Earthquake Precursor. Technical Physics 56, 1359. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784211090040>.

Balkhanov V.K., Bashkuev Y.B., 2013. On the Appearance of a Convective Toroidal Vortex in Lake Baikal. Technical Physics 58, 1582–1586. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784213110054>.

Balkhanov V.K., Bashkuev Y.B., Khaptanov V.B., 2010. Formation of Circular Rings on the Snow-Covered Ice Field of Lake Baikal. Technical Physics 55, 1266–1269. <http://dx.doi.org/10.1134/s1063784210090057>.

Bashkuev Y.B., 1996. Electrical Properties of Natural Layered Media. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 207 p. (in Russian) [Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207 с.].

Bashkuev Yu.B., Advokatov V.R., Khaptanov V.B., Buyanova D.G., Angarkhaeva L.Kh., 1993. Electromagnetic Characteristics of the Lake Baikal Water Area. Geology and Geophysics 9, 118–126 (in Russian) [Башкуев Ю.Б., Адвокатов В.Р., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г., Ангархаева Л.Х. Электромагнитные характеристики акватории оз. Байкал // Геология и геофизика. 1993. № 9. С. 118–126].

Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Buyanova D.G., Angarkhaeva L.Kh., Dembelov M.G., 2017. Geoelectric Characteristics of the Coastal Zone of Middle Baikal According to VLF/LF Radio Impedance Soundings. Journal of Radio Electronics 5 (in Russian) [Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г., Ангархаева Л.Х., Дембелов М.Г. Геоэлектрические характеристики прибрежной зоны Среднего Байкала по данным СДВ-ДВ радиоимпедансных зондирований // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5]. <http://jre.cplire.ru/jre/may17/10/text.pdf>.

Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., Angarkhaeva L.Kh., Boloev V.P., Hayakawa M., 2006. Radioprobng of Underground Structure of the Failure Gulf, Formed as a Result of the M7.5 Tsagan Earthquake. Physics and Chemistry of the Earth 31 (4–9), 210–214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.030>.

Budnev N.M., 2011. A Laboratory in Baikal Waters. Priroda 12, 11–22 (in Russian) [Буднев Н.М. Лаборатория в водах Байкала // Природа. 2011. № 12. С. 11–22]. <https://priroda.ras.ru/pdf/2011-12.pdf>.

Efremov V.N., 2013. Radio Impedance Sounding of Frozen Soils. Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, 204 p. (in Russian) [Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2013. 204 с.].

GeoScan32, 2013. Illustrated User Guide. LOGIS, Ramenskoye, 132 p. (in Russian) [GeoScan32. Иллюстрированное руководство пользователя. Раменское: ЛОГИС, 2013. 132 с.]. <http://www.geotech.ru/files/Okо20130718GeoSc32Man.pdf>.

Ireland G.C., 1961. A Provisional Ground Conductivity Map of Canada. Proceedings of the IRE 49 (11), 1674–1678. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1961.287793>.

Jol H.M. (Ed.), 2009. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science, Oxford, 508 p.

Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Shneer V.S., Machinin V.A., Kiktenko E.O., Budnev N.M., Zurbanov V.L., Mirgazov R.R., Buzin V.B., Panfilov A.I., 2015. Recent Results of Monitoring of the Vertical Component of the Electrical Field in Lake Baikal on the Surface-Bed Baseline. Geomagnetism and Aeronomy 55, 398–409. <http://dx.doi.org/10.1134/S0016793215020115>.

Mel'chinov V.P., Bashkuev Yu.B., Angarkhaeva L.Kh., Buyanova D.G., 2006. Electrical Properties of the Cryolithozone of Eastern Russia in the Radio Band. Buryatia Scientific Center SB RAS, Ulan-Ude, 257 p. (in Russian) [Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 257 с.].

ОКО-2 Radio-Technical Device of Subsurface Sounding, 2006. Technical Description. User Manual. Logic Systems, Moscow, 101 p. (in Russian) [Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2»:

Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. М.: Логические системы, 2006. 101 с.].

Semeikin N.P., Pomozov V.V., Dudnik A.V., 2005. Development of OKO Georadars. In: A.Yu. Grinev (Ed.), Problems of Subsurface Radiolocation. Radiotekhnika, Moscow, 231–236 (in Russian) [Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Развитие георадаров серии «ОКО» // Вопросы подповерхностной радиолокации / Ред. А.Ю. Гринев. М.: Радиотехника, 2005. С. 231–236].

Shneer V.S., Trofimov I.L., Korotaev S.M., Gaidash S.P., Kuznetsova T.V., Tsirulnic L.B., Panfilov A.I., Budnev N.M., Mirgazov R.R., 2007. Long-Term Observations of the Electric Field Vertical Component in Lake Baikal (Preliminary Results). Izvestiya. Physics of the Solid Earth 43 (3), 331–335. <https://doi.org/10.1134/S106935130704012X>.

Tezkan B., Saraev A., 2008. A New Broadband Radiomagnetotelluric Instrument: Applications to near Surface Investigations. Near Surface Geophysics 6 (4), 245–252.

Tulokhonov A.K., Garmaev E.Z., Bashkuev Y.B., Lomukhin Y.L., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., Slipenchuk M.V., Dorzhiev B.C., Ochirov O.N., 2018. Radiophysical Monitoring of the Lake Baikal Ice Cover. Geography and Nature Resources 39, 39–45. <https://doi.org/10.1134/S1875372818010067>.

Vladov M.L., Starovoitov A.V., 2004. Introduction to GPR. MSU Publishing House, Moscow, 153 p. (in Russian) [Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.].