

УДК 621.371

## **ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ СРЕДНЕГО БАЙКАЛА ПО ДАННЫМ СДВ-ДВ РАДИОИМПЕДАНСНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

**Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, Д. Г. Буянова, Л. Х. Ангархаева, М. Г. Дембелов**

**Институт физического материаловедения СО РАН,  
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д.6**

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2016 г., после доработки – 23 мая 2017 г.

**Аннотация.** Метод радиоимпедансного зондирования позволяет определить структуру и физические свойства верхней части земной коры. Обосновано применение метода радиоимпедансного зондирования для электрического картирования прибрежной зоны оз. Байкал по удельному электрическому сопротивлению ( $УЭС$ ) в рамках многослойной модели среды. Проведен анализ амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля в точке наблюдения по результатам сверхдлинноволновых–длинноволновых (СДВ-ДВ) радиоимпедансных зондирований. Определены 2-х и 3-х –слойные геоэлектрические разрезы (ГЭР) на глубину до 100 метров в 6 пунктах зондирования Чивыркуйского залива и на трех профилях общей длиной 1000 м, в том числе на курорте Горячинск. На островах Бакланий и Голый установлено высокое сопротивление кристаллического фундамента, достигающее 1000-1420 Ом·м. Геоэлектрический разрез на профиле береговой зоны курорта Горячинск показал наличие высокопроводящего слоя (11-22 Ом·м) на глубине 6-8 метров, который мы связываем с тектоническим разломом, что подтверждается данными георадарного зондирования. Созданы геоэлектрические модели береговой зоны средней части акватории оз. Байкал.

**Ключевые слова:** озеро Байкал, радиоимпедансное зондирование, геоэлектрический разрез, электрическое сопротивление.

**Abstract.** The method of radio-impedance sounding is an important source of information about the structure and physical properties of the upper part of the earth's

crust. The method of radio-impedance sounding for electrical mapping of the coastal area of the lake Baikal by electrical resistivity within of a multi-layer medium model is substantiated. The method is based on analysis of amplitude-phase structure of the electromagnetic field in the observation point from the radio-impedance sounding data on VLF-LF radio stations. The quantitative data of the electrical properties (modulus and phase of surface impedance) and the geoelectric structure (2-3 layers geoelectric sections to a depth of 100 meters) of the coastal zone of the Chivyrkuy Bay of the lake Baikal and resort Goryachinsk, Svyatoy Nos Peninsula were obtained. On the Baklanyi island and Golyi island (Chivyrkuy Bay) high resistance crystalline basement, reaching 1000-1420  $\text{Om}\cdot\text{m}$  are established. Revealed a significant feature of the geoelectric section on the coastal zone profile of resort Goryachinsk on the depth of 6-8 meters manifested thin highly conductive layer with a resistivity of 11 to 22  $\text{Om}\cdot\text{m}$ , it maybe the zone of tectonic fault, which is confirmed by of georadar sounding data. The geoelectric model of the middle part of the coastal zone of the lake Baikal was created.

**Key words:** Lake Baikal, radio impedance sounding, geoelectrical section, electric resistivity.

## 1. Введение

Разработка радиофизических индикаторов состояния экосистемы оз. Байкал как участка мирового природного наследия включает в себя исследование электромагнитных характеристик акватории озера Байкал на основе комплексного, синхронного и долговременного контроля гидросферы, литосферы и атмосферы акватории и прибрежной зоны радиофизическими методами [1-4], а именно:

- определение электрических свойств воды, льда и донного грунта;
- определение геоэлектрического разреза (ГЭР) для береговой зоны акватории и обоснование соответствующих геоэлектрических моделей.

Под радиофизическими индикаторами состояния мы понимаем тесно связанные с условиями окружающей среды физические величины (удельная электропроводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемости,

температура и плотность среды и т.д.), отображающие количественные характеристики контролируемых процессов и явлений, протекающих в озерных водоемах.

Целью работы является определение параметров геоэлектрического разреза (ГЭР) прибрежной зоны среднего Байкала в районе Чивыркуйского залива и курорта Горячинск по данным сверхдлинноволновых–длинноволновых (СДВ-ДВ) радиоимпедансных зондирований. СДВ-ДВ радиоимпедансное зондирование позволяет определить свойства прибрежных горных пород и донных грунтов по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) и толщине слоя. Следует отметить, что электромагнитные исследования на Байкале проводились эпизодически силами Лимнологического института СО РАН, Иркутского государственного университета, Института ядерных исследований РАН, Бурятского института естественных наук СО РАН и других организаций [1-6].

## 2. Методы исследования

Радиофизическая задача получения количественных данных об электрических свойствах и геоэлектрическом строении прибрежной зоны среднего Байкала в районе Чивыркуйского залива и курорта Горячинск решалась на основе анализа амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля в точке наблюдения по данным метода радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах радиоволн [1-6]. Метод радиоимпедансного зондирования (РИЗ) основан на изучении амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля на границе раздела “воздух - подстилающая среда”. Он позволяет производить непосредственные измерения модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_\delta$  поверхностного импеданса с использованием полей радиостанций. Физической основой метода является скин-эффект. Из точных граничных условий известно, что

$$E_{1x} = E_{2x} \text{ при } z = 0;$$

$$H_{1y} = H_{2y} \text{ при } z = 0,$$

где  $E_{1x}, H_{1y}, E_{2x}, H_{2y}$  – тангенциальные составляющие электрического и магнитного полей на границе раздела (индекс 1 – в воздухе, 2 – в среде). Следовательно, измерения  $E_\tau$  и  $H_\tau$  можно проводить как в воздухе, так и в среде. По измеренным тангенциальным составляющим электрического и магнитного полей  $E_\tau$  и  $H_\tau$  определяется приведенный поверхностный импеданс подстилающей среды  $\delta = E_\tau / H_\tau \cdot Z_0$ , где  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$  – характеристический импеданс свободного пространства. При падении плоской вертикально поляризованной волны на плоскую поверхность однородной изотропной и немагнитной среды имеет место соотношение:

$$\delta = \sqrt{\varepsilon_k - \sin^2 \Theta} / \varepsilon_k,$$

где  $\varepsilon_k = \varepsilon + i60\lambda\sigma$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\sigma$  – электропроводимость среды, См/м;  $\lambda$  – длина волны, м;  $\Theta$  – угол падения волны. Далее в статье также рассматривается удельное электрическое сопротивление (УЭС)  $\rho = 1 / \sigma$ , Ом·м.

Для слоистой плоскопараллельной среды  $\delta = \delta_1 \cdot Q^{(n)}$ , где  $\delta_1 = \sqrt{\varepsilon_{1k} - \sin^2 \Theta} / \varepsilon_{1k}$  – приведенный поверхностный импеданс первого слоя;  $Q^{(n)} = f(\omega, \theta, \varepsilon_i, \sigma_i, h_i)$  – корректирующий множитель, учитывающий влияние нижележащих слоев. Поверхностный импеданс зависит от электрических параметров слоев  $\sigma_i, \varepsilon_i$ , толщины слоев  $h_i$  и частоты поля  $\omega$  и не зависит от мощности излучения радиопередатчика и расстояния до него, а также от угла падения волны  $\theta$  при  $|\varepsilon_k| \gg 1$ . Глубина проникновения электромагнитного поля (скин-слой) в однородную проводящую среду определяется соотношением  $h = \sqrt{2 / (\omega\mu_0\sigma)}$ , и зависит от частоты  $\omega$  и электропроводимости среды  $\sigma$ ,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м. Следовательно, изменяя частоту  $\omega$ , можно изменять

глубину проникновения поля в среду и получать сведения об электрических свойствах геологической структуры на различных глубинах. В этом и состоит принцип радиоинтроскопии подстилающей среды (акватории или горного массива). Скин - слой при электропроводимости горной породы  $\sigma = 10^{-4}$  См/м составляет  $h = 50$  м на частоте 1 МГц.

Для измерений использованы электромагнитные поля СДВ-ДВ радиостанций, работающих на частотах 22,2; 50; 198; 234; 279 кГц. Измерительная аппаратура [1, 5] представляет селективный микровольтметр-фазометр, измеряющий частотную зависимость модуля и фазы поверхностного импеданса  $\delta$ , по которым при решении обратной задачи для модели слоистой среды находятся параметры геоэлектрического разреза  $(\sigma_i, \varepsilon_i, h_i)$ , где  $\sigma_i$  - электропроводимость  $i$ -го слоя,  $\varepsilon_i$  - его диэлектрическая проницаемость,  $h_i$  - толщина  $i$ -го слоя. При измерениях использовался портативный импедансметр ИПИ-300, разработанный и изготовленный в Институте земной коры СПбГУ. Методика измерений поверхностного импеданса в СНЧ-СДВ-ДВ-СВ-КВ диапазонах подробно рассмотрена в работах [1, 5]. Для измерений горизонтальной составляющей электрического поля  $E_\tau$  применялась симметричная незаземленная приемная линия длиной 20 м, позволяющая работать как на высокопроводящих, так и на низкопроводящих ГЭР. Датчиком горизонтальной составляющей магнитного поля  $H_\tau$  служила рамочная антенна. С ее помощью по минимуму сигнала находилось направление на требуемую радиостанцию. Симметричная приемная линия  $E_\tau$  раскладывалась по пеленгу на радиостанцию. При измерениях диаграммы направленности магнитной антенны и приемной линии были перпендикулярны. Азимуты источников поля были во всех точках зондирования примерно одинаковыми (район г. Иркутска), поэтому возможно было работать на группу этих радиостанций. Погрешности измерения модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_\delta$  импеданса составляли  $\pm(3-5)\%$  и  $2\div 3^\circ$ , соответственно. Разработана методика измерения поверхностного импеданса

водной среды оз. Байкал с помощью герметичной системы плавающих датчиков горизонтальной электрической составляющей поля  $E_r$  и портативных измерителей ИПИ-300.

В геолого-изыскательских работах для определения объемного распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов повсеместно используются методы электроразведки на постоянном или низкочастотном переменном токе (метод вертикального электрического зондирования – ВЭЗ; электротомография). Метод ВЭЗ основан на геометрическом принципе электромагнитного зондирования – глубина проникновения электрического тока регулируется расстоянием от источника поля до приемника (разносом). Теоретической основой ВЭЗ является решение задачи о поле постоянного или низкочастотного переменного тока (до десятков герц), возбуждаемом в горизонтально – слоистой среде. Широкое практическое распространение получила симметричная установка АМNB. На земной поверхности в точках А и В располагаются заземления, через которые от источника тока в землю поступает ток  $I$ . Электрическое поле питающих заземлений исследуется измерением разности потенциалов  $\Delta U_{MN}$  между точками М и N, в которые помещены приемные электроды. В результате измерений получают эффективный параметр, имеющий размерность удельного электрического сопротивления и называемый кажущимся сопротивлением  $\rho_k$ . Результаты измерений изображают в виде графика  $\rho_k = f(AB/2)$ , который служит основной исходной величиной для интерпретации. Количественные характеристики геоэлектрического разреза (ГЭР)  $\rho_i$  и  $h_i$  определяют по специальным палеткам или программам на ЭВМ. В работах [1, 5, 6] проведено сравнение метода радиоимпедансного зондирования (РИЗ) и метода ВЭЗ. В них показано существенное преимущество метода РИЗ по производительности при одинаковой с методом ВЭЗ разрешающей способности. В методе ВЭЗ при разносах  $AB/2 = 270$  м время измерений на точке ВЭЗ составляет 2-3 часа, тогда как измерения поверхностного импеданса  $\delta$  методом РИЗ на 5-7 частотах

занимают всего 10-15 минут. Следует также отметить, что в работах [1, 5] показано отсутствие частотной дисперсии электропроводимости горных пород между постоянным током и на переменном токе на в диапазоне частот 10-1000 кГц. Этот важный физический вывод получен на однородных и многослойных геоэлектрических разрезах методами РИЗ и ВЭЗ. Измеренная методом РИЗ комплексная величина поверхностного импеданса используется для расчетов распространения СДВ-СВ радиоволн на многокусочных импедансных трассах.

Для решения обратной задачи радиоимпедансного зондирования для слоистой полупроводящей среды, удовлетворяющей импедансным граничным условиям, разработан алгоритм метода регуляризации на основе гипотетического разреза [7]. Сглаживающий функционал А.Н. Тихонова имеет

вид:  $M_{\alpha}[g] = I[g] + \alpha\Omega[g]$ , где  $I[g] = \sum_{l=1}^L |\delta_l - \delta_{l_0}|^2$  – функционал невязки;

$\Omega[g] = \sum_{n=1}^N p_n |\varepsilon_n - \varepsilon_n^0|^2 + \sum_{n=1}^N q_n |\sigma_n - \sigma_n^0|^2 + \sum_{n=1}^{N-1} r_n |h_n - h_n^0|^2$  – стабилизирующий

функционал;  $g = (\varepsilon, \sigma, h)$  – параметры многослойной полупроводящей среды;

$\alpha$  – параметр регуляризации;  $(\varepsilon^0, \sigma^0, h^0)$  – гипотетическое распределение

параметров разреза;  $p_n, q_n, r_n$  – веса соответствующих параметров;  $\delta_{l_0}$  –

экспериментальные значения импеданса на  $l$ -ой частоте. Минимизация

рассматриваемого функционала производилась с помощью метода Ньютона-

Канторовича (метода линеаризации). Критерием выбора “наилучшего”

геоэлектрического разреза служит минимум среднеквадратического отклонения

экспериментальных значений импеданса от рассчитанных для модели  $n$ -

слойной среды.

### 3. Результаты СДВ-ДВ радиоимпедансных зондирований

Следует отметить, что Прибайкалье не полностью входит в зону вечной мерзлоты России [8, 9]. Климат здесь континентальный, с жарким летом и холодной зимой. При этом акватория оз. Байкал площадью свыше 31 тыс. км<sup>2</sup> оказывает тепляющее воздействие на прибрежные районы. Годовая сумма

осадков на южном Байкале достигает 1200 мм. Сезонные физические процессы в подстилающей среде подробно изучены в наших работах [1, 5, 6]. Электрические свойства многолетнемерзлых горных пород востока России детально рассмотрены в работах [8, 9]. Представленные в статье результаты радиоимпедансных зондирований получены в летнее время.

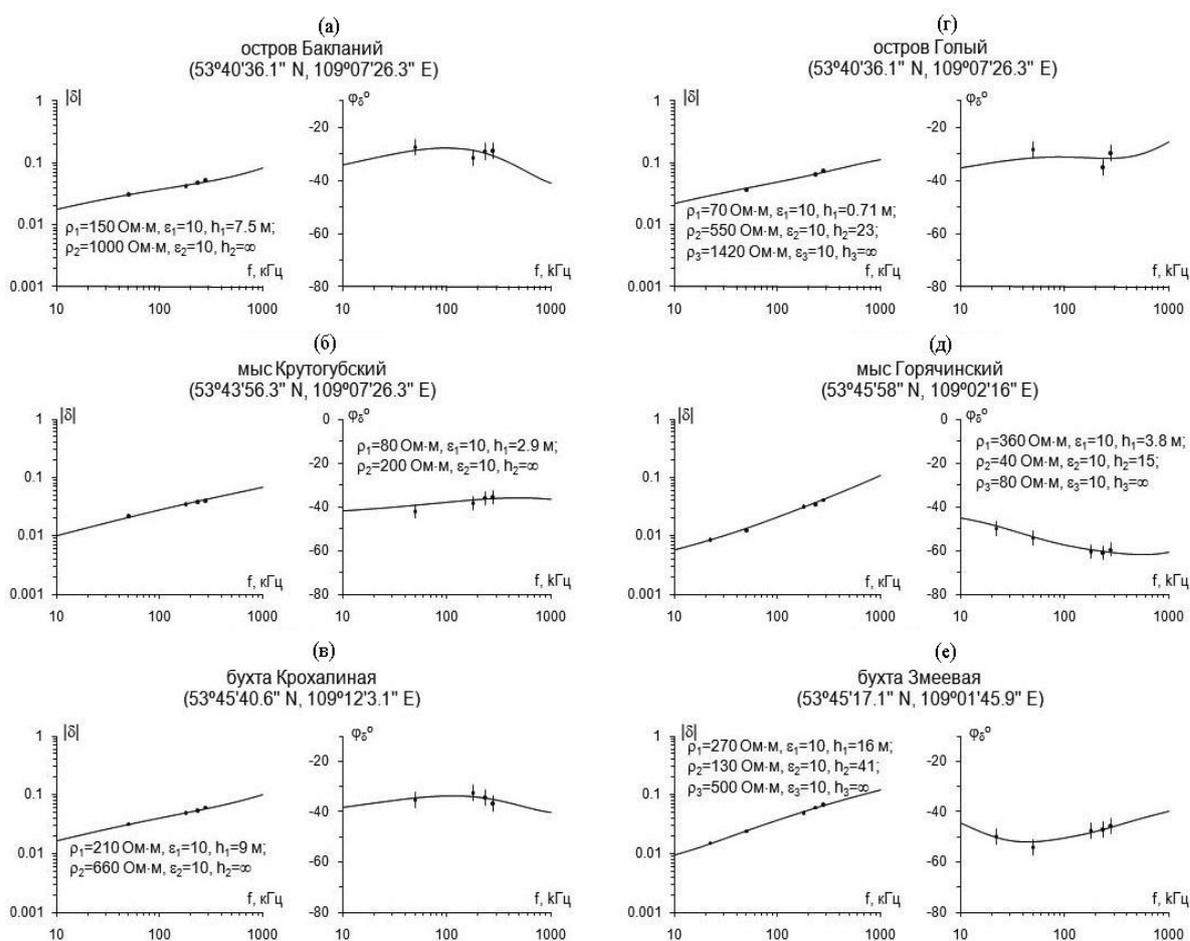


Рис. 1. Результаты интерпретации частотной зависимости поверхностного импеданса для различных пунктов наблюдений в Чивыркуйском заливе оз. Байкал: а, б, в – двухслойные ГЭР типа  $\rho_1 < \rho_2$ ; г, д, е – трехслойные ГЭР.

Проведено радиоволновое зондирование импедансной подстилающей среды в Чивыркуйском заливе оз. Байкал и в районе курорта Горячинск в СДВ-ДВ диапазонах радиоволн. На рис. 1 представлены данные интерпретации радиоимпедансных зондирований. Определены 2-х и 3-х –слойные геоэлектрические разрезы (ГЭР) в 6 пунктах зондирования Чивыркуйского

залива и на трех профилях общей длиной 1000 м: 1) остров Бакланий; 2) мыс Крутогубский; 3) бухта Крохалиная; 4) остров Голый; 5) мыс Горячинский; 6) бухта Змеевая. На островах Бакланий и Голый установлено высокое сопротивление кристаллического фундамента, достигающее 1000-1420 Ом·м.

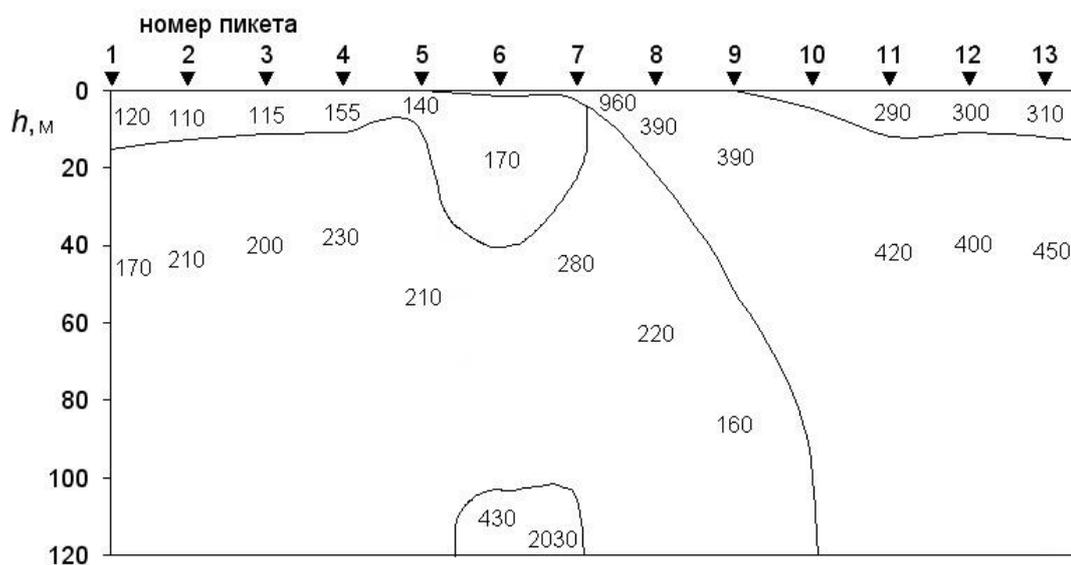


Рис. 2. Геоэлектрический разрез побережья оз. Байкал в районе устья реки Большой Чивыркуй.

Определен геоэлектрический разрез на песчаной косе в районе устья реки Большой Чивыркуй (53°46' с.ш., 109°13' в.д.) на профиле протяженностью 520 метров (рис. 2). Измерения проведены на частотах 22.2; 50; 234 и 279 кГц через 40 метров. На рисунках цифры в поле графиков означают УЭС в Ом·м. Плавные линии показывают границы слоев с разными УЭС. Так, например, на пикете №3 верхний слой имеет УЭС 115 Ом·м и толщину 12 м, подстилающий слой имеет УЭС 200 Ом·м. Изменения модуля и фазы поверхностного импеданса на частотах 50; 234; 279 кГц и геоэлектрический разрез, построенный по результатам интерпретации частотных зависимостей поверхностного импеданса на профиле “Карга” на Каргинском перешейке полуострова Святой Нос длиной 200 м (53°31' с.ш., 108°57' в.д.) представлены на рис 3. Разрез определен как двухслойный типа  $\rho_1 > \rho_2$ .

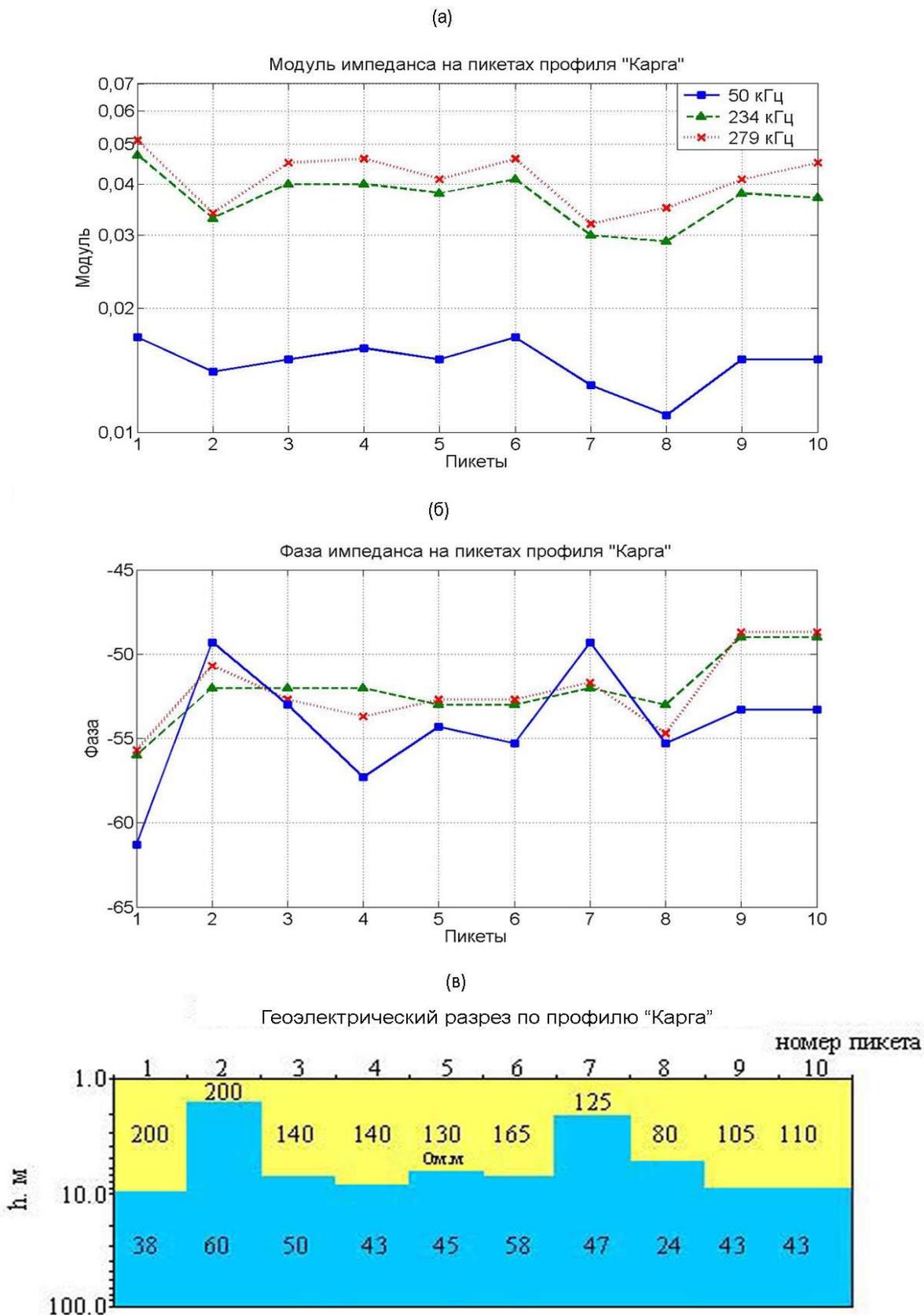


Рис. 3. Изменение модуля и фазы поверхностного импеданса в СДВ-ДВ диапазонах на профиле "Карга" (а, б) и геоэлектрический разрез (в).

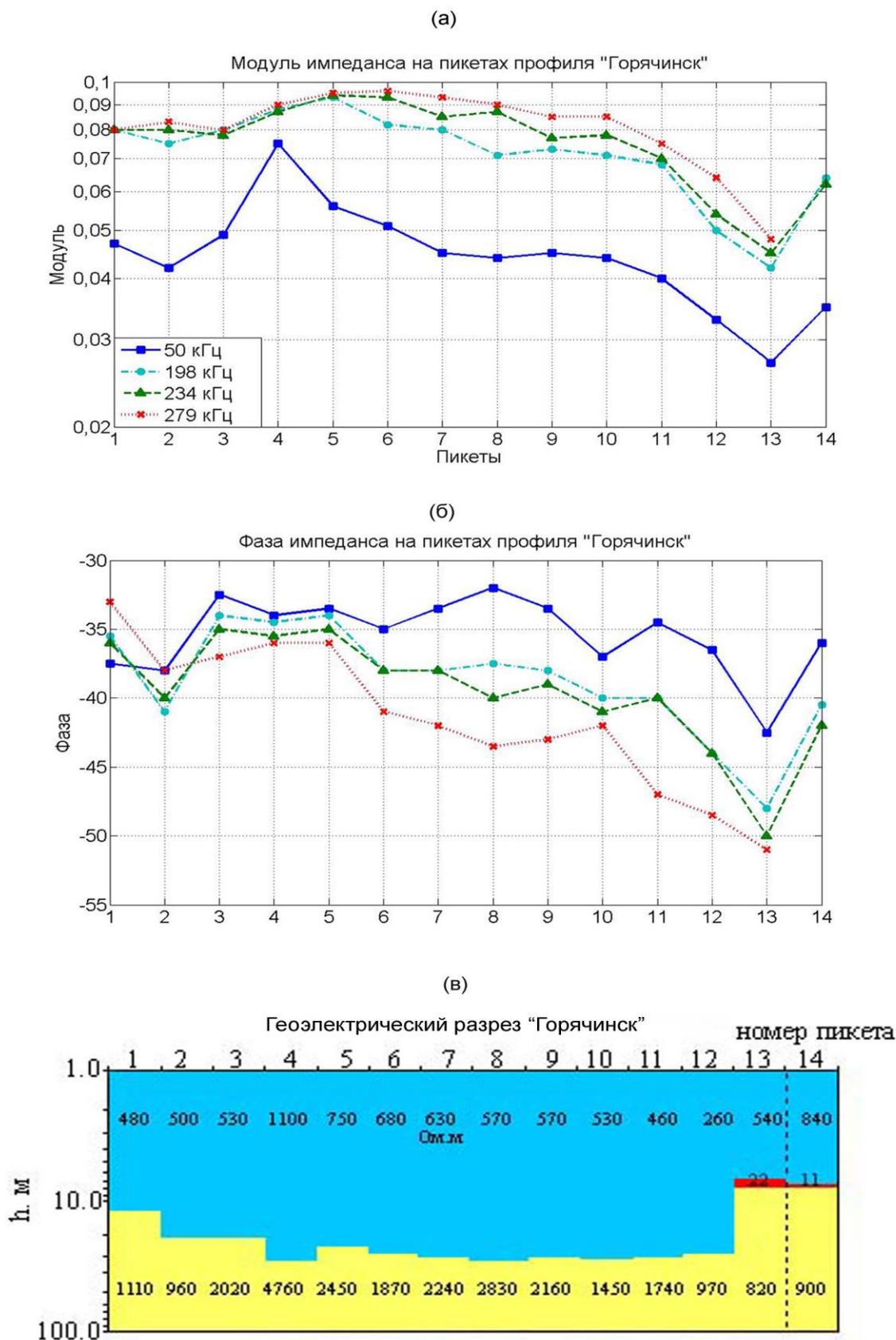


Рис. 4. Изменение модуля и фазы поверхностного импеданса в ДВ диапазоне на профиле "Горячинск" (а, б) и геоэлектрический разрез (в).

На рис. 4 приведены изменения модуля и фазы поверхностного импеданса в ДВ диапазоне на профиле “Горячинск” и геоэлектрический разрез длиной 280 м ( $52^{\circ}48'$  с.ш.,  $107^{\circ}57'$  в.д.), построенный по результатам интерпретации частотных зависимостей поверхностного импеданса. При интерпретации зондирований выявлена существенная особенность ГЭР на пикетах 13 и 14 – на глубинах 6-8 метров проявляется тонкий высокопроводящий слой с УЭС от 11 до 22 Ом·м. Этот слой мы связываем с уровнем минерализованных грунтовых вод. В ныне засыпанном в том же районе колодце всегда была солоноватая вода. Об этом же свидетельствуют данные электрометрических измерений проб грунтовой воды из двух расположенных на расстоянии 50 м друг от друга скважин, имеющих УЭС в интервале от 10 до 30 Ом·м. По-видимому, эта область является зоной тектонического разлома, которая подтверждается также данными георадарного зондирования.

#### **4. Заключение**

В результате проведенных исследований обосновано применение метода радиоимпедансного зондирования для электрического картирования прибрежной зоны акватории оз. Байкал по удельному электрическому сопротивлению в рамках многослойной модели среды. По результатам СДВ-ДВ радиоимпедансного зондирования определены 2-х и 3-х –слойные геоэлектрические разрезы в 6 пунктах Чивыркуйского залива и на трех профилях общей длиной 1000 м, в том числе на курорте Горячинск. На островах Бакланий и Голый установлено высокое сопротивление кристаллического фундамента, достигающее 1000-1420 Ом·м. На профиле “Горячинск” показано наличие тонкого высокопроводящего слоя, который мы связываем с тектоническим разломом, что подтверждается данными георадарного зондирования и электрометрических измерений проб грунтовой воды. Созданы геоэлектрические модели береговой зоны средней части акватории оз. Байкал.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-45-04355 p\_сибирь\_a и № 15-41-04430 p\_сибирь\_a).

### **Литература**

1. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207 с.
2. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э.Л. Афраимович [и др.]; отв. ред. Г.А. Жеребцов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т солнечно-земной физики [и др.] // Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2012. 304 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 35).
3. Башкуев Ю.Б., Адвокатов В.Р., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г., Ангархаева Л.Х. Электромагнитные характеристики акватории оз. Байкал // Геология и геофизика. - № 9, 1993. С. 118-126.
4. Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., Angarkhaeva L.Kh, Boloev V.P. and Hayakawa M. Radioprobing of underground structure of the Failure Gulf, formed as a result of the M7.5 Tsagan earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31. Issues 4-9. pp. 210-214.
5. Цыдыпов Ч.Ц., Цыденов В.Д., Башкуев Ю.Б. Исследование электрических свойств подстилающей среды. Новосибирск: Наука, 1979. 176 с.
6. Доржиев В.С., Адвокатов В.Р., Бодиев Б.Б. Геоэлектрические разрезы юга Сибири и Монголии. М.: Наука, 1987. 94 с.
7. Ангархаева Л.Х. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610893. Российская Федерация / заявл. 11.04.2002; зарегистр. 06.06.2002.
8. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск: Изд-во ФБГУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. 204 с.
9. 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. 258 с.

**Ссылка на статью:**

Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, Д. Г. Буянова, Л. Х. Ангархаева, М. Г. Дембелов. Геоэлектрические характеристики прибрежной зоны среднего Байкала по данным СДВ-ДВ радиоимпедансных зондирований. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/10/text.pdf>