

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.5>

УДК: 550.837.7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ НЕКОТОРЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ ПО ДАННЫМ РАДИОИМПЕДАНСНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

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

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

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2022 г.

Аннотация. Методом радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах электромагнитных волн измерено удельное электрическое сопротивление (электропроводимость) некоторых слоистых осадочных горных пород Байкальской природной территории. Определены их геоэлектрические разрезы. Информация о геоэлектрическом разрезе (ГЭР) осадочных горных пород Байкальской природной территории может быть использована при инженерно-геологических изысканиях трассы газопровода «Сибирь-Монголия-Китай», а также при анализе физико-химических причин появления коррозионных процессов на длинных трубопроводных структурах континентальных районов Евразии. Методика радиоимпедансного зондирования может быть применена для измерения электрических свойств различных грунтов данной территории в рамках слоистой модели среды с плохо и хорошо проводящим основанием.

Ключевые слова: радиоимпедансное зондирование, геоэлектрический разрез, Байкальская природная территория, осадочные горные породы.

Финансирование: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-787 на реализацию

крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Автор для переписки: Башкуев Юрий Буддич, buddich@mail.ru

Введение

Актуальность статьи определяется тем, что информация о геоэлектрическом разрезе (ГЭР) осадочных горных пород Байкальской природной территории (БПТ) может быть использована при инженерно-геологических изысканиях трассы газопровода «Сибирь-Монголия-Китай». Результаты исследований электрических свойств и геоэлектрических разрезов слоистой подстилающей среды БПТ и всего Востока России по данным вертикальных электрических и радиоимпедансных зондирований (ВЭЗ и РИЗ) обобщены в работах [1-6]. В Приложении 1 работы [1] представлены результаты определения 75 ГЭР и измерений поверхностного импеданса в диапазоне 17-665 кГц для 6 типичных комплексов горных пород региона. Приведем классификацию этих комплексов: 1) пески эоловые и аллювиальные; 2) солончаки; 3) многолетнемерзлые отложения; 4) кристаллические породы (граниты, базальты, доломиты) трещиноватые и монолитные; 5) угленосные отложения, глины, суглинки и торфяники; 6) гравийно-песчаные отложения, лессы. Следует отметить, что детального описания некоторых типов осадочных горных пород в районах будущей трассы газопровода «Сибирь-Монголия-Китай» в работах [1-6], к сожалению, не приводится. Некоторые результаты по Тункинской долине представлены в работе [7], по рекам, озерам и озеру Байкал представлены в наших работах [8-11]. Также нами исследованы электромагнитные процессы и явления в атмосфере БПТ [12]. В данной статье представлены результаты определения удельного электрического сопротивления (УЭС) и геоэлектрических разрезов (ГЭР) типичных слоисто-неоднородных осадочных пород Байкальской природной территории, полученные методом радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах

радиоволн. Совокупность результатов, характеризующих верхнюю часть земной коры и атмосферу БПТ будет полезна при разработке средств защиты трубопровода и компрессорных станций от пожаров, землетрясений, а также при анализе физико-химических причин проявления коррозионных процессов на длинных трубопроводных структурах континентальных районов Евразии.

1. Аппаратура и методика эксперимента

Методы исследований

Метод радиоимпедансного зондирования применен для измерения электрических свойств различных грунтов данной территории в рамках слоистой модели среды с плохо и хорошо проводящим основанием. Измерения поверхностного импеданса проведены в 52 пунктах наблюдения методом радиоимпедансного зондирования. 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 АМ 3003 с датчиком УК-0.2/1 от кондуктометра ММЗЧ-0.4. Глубина воды определялась лотом.

Радиоимпедансное зондирование

Цель радиоимпедансных зондирований заключалась в определении частотной зависимости поверхностного импеданса δ слоистой структуры осадочных горных пород БПТ на радиочастотах СДВ-ДВ диапазонов. Эти данные необходимы для определения параметров геоэлектрического разреза (ГЭР) и типа его геоэлектрического строения. Измерения поверхностного импеданса δ необходимы также в радиофизике для оценки точности расчетов распространения СДВ-ДВ-СВ электромагнитных волн над земной поверхностью по локальным электрическим характеристикам подстилающей среды.

В пункте наблюдения (на i -ом пикете) измерялся 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 [1-6, 8].

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 3–5 частотах действующих радиостанций. Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость однородной среды $\varepsilon_k = \varepsilon + i60\lambda\sigma$ определяет ее электрические свойства. Здесь ε есть ее диэлектрическая проницаемость, а σ – электропроводимость среды; λ – длина радиоволны. Мнимая часть $\varepsilon_k = \varepsilon + i60\lambda\sigma$ 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 осадочных пород пример. На частоте 10 кГц и электропроводимости грунта $\sigma=10^{-2}$ 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 основаны методы радиоволнового зондирования слоистых сред [1-6, 8]. Они позволяют определять строение среды и ее электрические свойства на разных глубинах. Электропроводимость σ_i , диэлектрическая проницаемость ε_i и толщина h_i каждого i -го слоя определяются по измеренной частотной зависимости модуля и фазы импеданса при решении обратной задачи методом регуляризации А.Н. Тихонова для 2–4-х слойной модели геоэлектрического разреза (ГЭР) [13]. Исследования электрических свойств и геоэлектрического разреза подстилающей среды в СДВ-СВ диапазонах электромагнитных волн выполнены в США, Канаде, Австралии, России и Германии [1-11]. Основы

теории и практического использования СДВ-СВ диапазонов радиоволн для целей электроразведки были разработаны профессором Ленинградского государственного университета д.г.-м.н. А.В. Вешевым и развиты в последние годы его учениками [14-22]. Импедансные измерения проведены микровольтметром-фазометром ИПИ-300. Погрешность измерений модуля импеданса не превышала $\pm 5\%$, а фазы импеданса $\pm(1\div 2)^\circ$. Магнитное поле H_τ измерялось экранированной магнитной рамкой, а электрическое поле E_τ – незаземленной приемной симметричной антенной длиной 20 м. На рис. 1 представлен результат интерпретации частотной зависимости поверхностного импеданса на 5 частотах СДВ-ДВ диапазонов для талых горных пород.

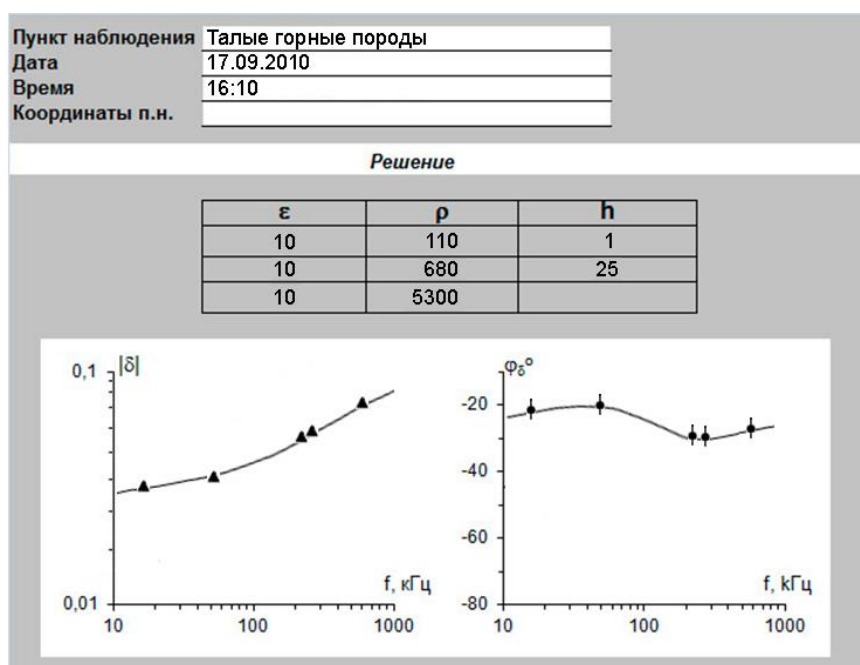
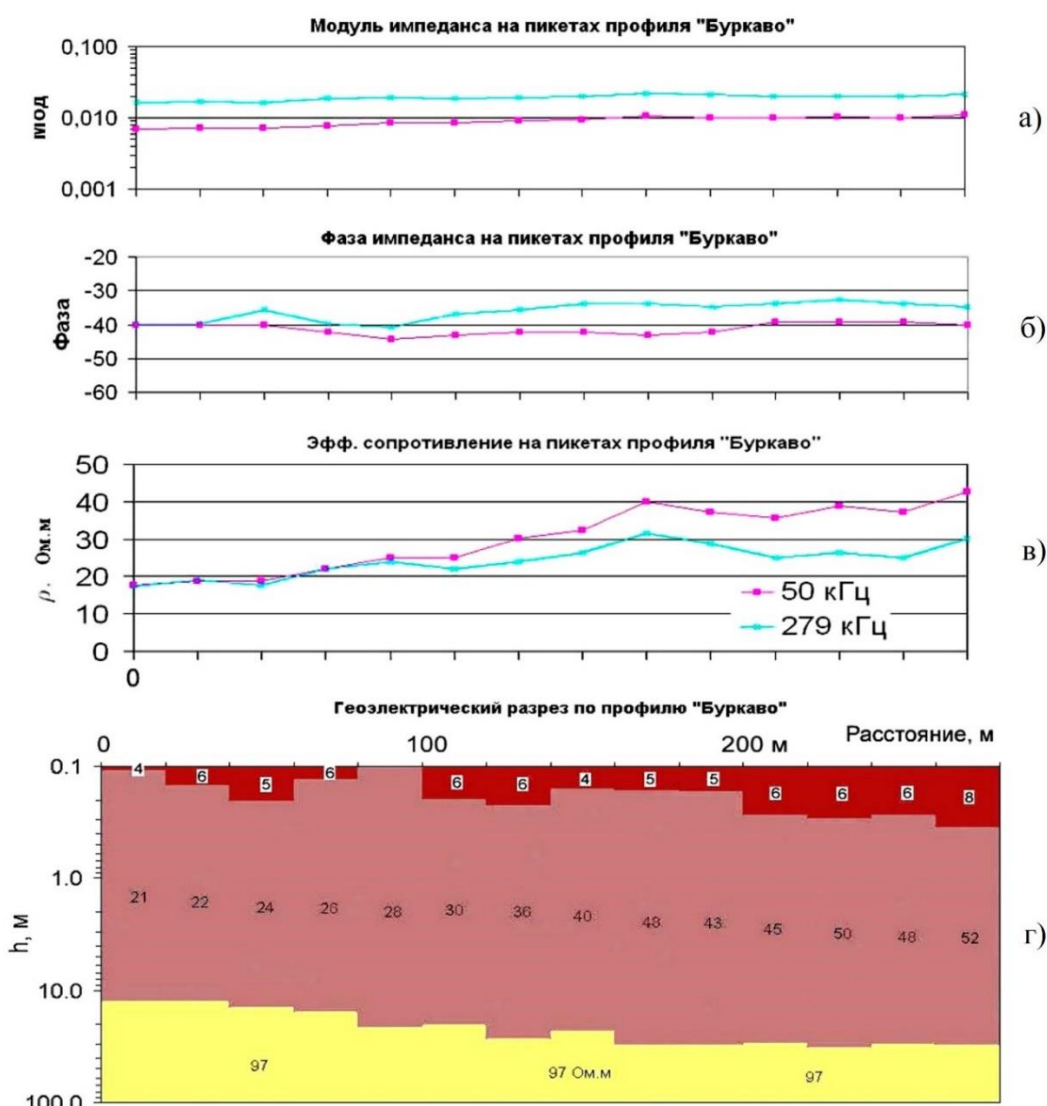


Рис. 1. Результаты измерений модуля и фазы импеданса на 5 частотах для талых горных пород и электрические параметры восстановленного геоэлектрического разреза. Точки и треугольники – измеренные значения. Сплошные линии – импеданс для полученного решения

2. Обсуждение результатов. Анализ радиоимпедансных зондирований

Радиофизическая задача определения электрических свойств и геоэлектрического разреза некоторых осадочных горных пород БПТ решалась на основе анализа амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля в 52 пунктах наблюдения по данным метода радиоимпедансного зондирования [1-6]. Во время измерений использовались электромагнитные поля СДВ-ДВ

радиостанций с достаточно высокими уровнями сигналов и стабильным режимом работы. Для решения обратной задачи электромагнитного зондирования слоистой полупроводящей среды использован метод регуляризации на основе гипотетического разреза [13]. Начнем рассмотрение с геоэлектрических разрезов черноземов Иркутской области на глубину до 50-100 м для профиля длиной 260 м. На рис. 2 представлены результаты радиоимпедансных зондирований на профиле «Буркаво» в зоне развития черноземных и лугово-черноземных почв Аларской степи Черемховского Приангарья.



Черноземы и лугово-черноземные почвы толщиной до 25–35 см (гумусовый горизонт) имеют очень низкое удельное сопротивление от 4 до 8 Ом·м и подстилаются глинисто-песчаными породами с сопротивлением от 21 до 52 Ом·м толщиной до 25 метров, расположенными на валунно-галечниковых отложениях поймы р. Аларь. Геоэлектрический разрез хорошо отражает квази-слоистое строение в целом низкоомной толщи.

Методом радиоимпедансного зондирования детально исследованы осадочные комплексы горных пород дельты р. Селенги. На рис. 3 представлен геоэлектрический разрез на профиле «Ранжурово 3» длиной 140 м в зоне развития эоловых песков вблизи отметки высоты 468.7 м. Верхний слой сухих песков характеризуется наибольшим удельным сопротивлением в разрезе $\rho_1 = (440 \pm 40)$ Ом·м, при толщине $h_1 = (17 \pm 3)$ м. Второй слой с параметрами $\rho_2 = (190 \pm 40)$ Ом·м, $h_2 = (50 \pm 6)$ м сложен увлажненными гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем. Третий слой с $\rho_3 = (50 \pm 30)$ Ом·м представлен обводненными песками и суглинками с содержанием галечникового материала. Геоэлектрический разрез профиля «Ранжурово-3» определен как трехслойный типа Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$). Границы геоэлектрических слоев хорошо коррелируют с формой рельефа профиля эолового образования.

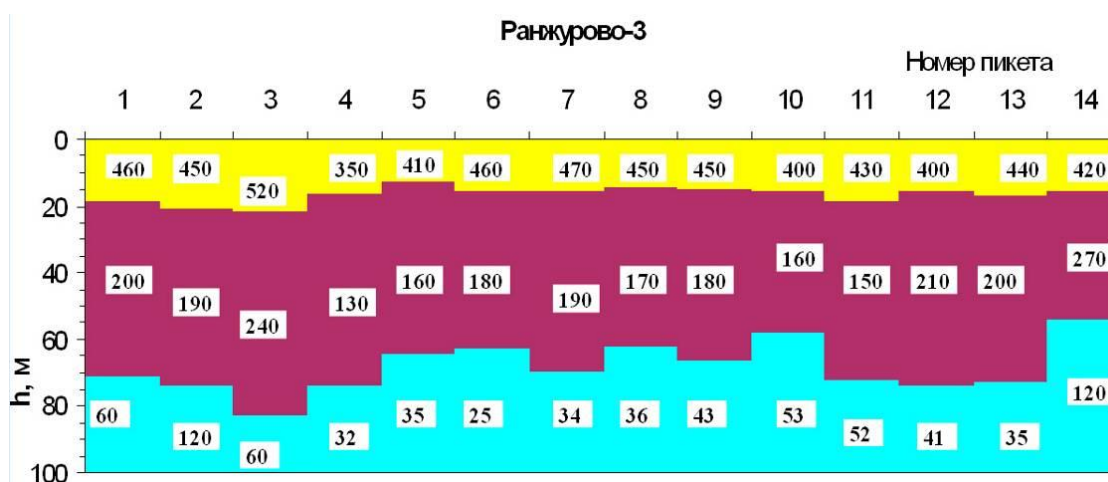


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю «Ранжурово-3»

Профиль «Ранжурово-1» (рис. 4) расположен на низком, слегка заболоченном берегу протоки р. Селенга и обладает хорошо выдержанным на протяжении 200 м геоэлектрическим разрезом:

$$\rho_1 = (42 \pm 5) \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$h_1 = (3.8 \pm 0.3) \text{ м};$$

$$\rho_2 = (300 \pm 25) \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$h_2 = (15 \pm 2.6) \text{ м};$$

$$\rho_3 = (140 \pm 20) \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

$$h_3 = \infty.$$

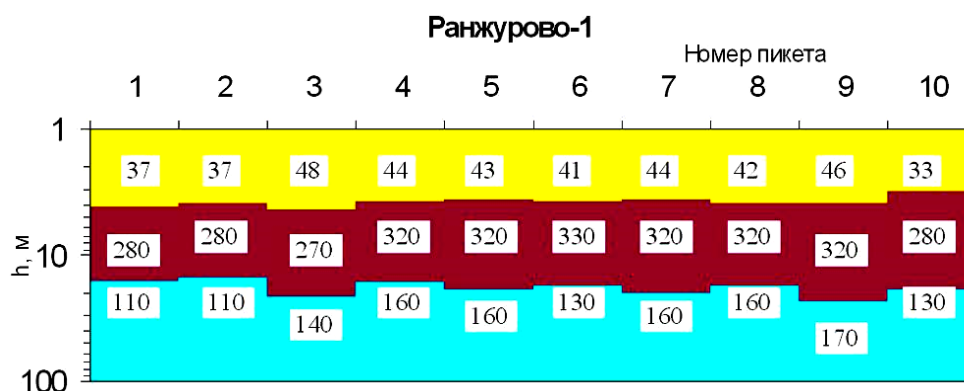


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю «Ранжурово-1»

Верхний слой представлен песками с суглинками. Этот слой близок по электрическим свойствам к третьему слою на профиле «Ранжурово-3». Второй слой представлен гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, третий слой представлен песками с гравием и галькой. Геоэлектрический разрез профиля «Ранжурово-1» определен как трехслойный типа К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$).

Аналогичный тип разреза имеет и профиль «Закалтус» (рис. 5). Он расположен в средней части Кабанских торфяных болот (Мало-Колесовская группа). Толщина торфа на этом массиве достигает 6–7 и более метров (первый слой с УЭС 40–55 Ом·м). Под торфом залегают суглинки или мелкозернистые глинистые пески (2 слой с УЭС 110–160 Ом·м). Ниже залегают обводненные крупнозернистые пески, часто с примесью гравия (3 слой). Типичный геоэлектрический разрез торфяных болот определен как трехслойный типа К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). Такому типу ГЭР соответствует импедансная слоистая структура

слабо-индуктивного типа. Так, на частоте 50 кГц фаза импеданса φ_{δ} на 7 пикетах попадает в слабо-индуктивную область импедансов.

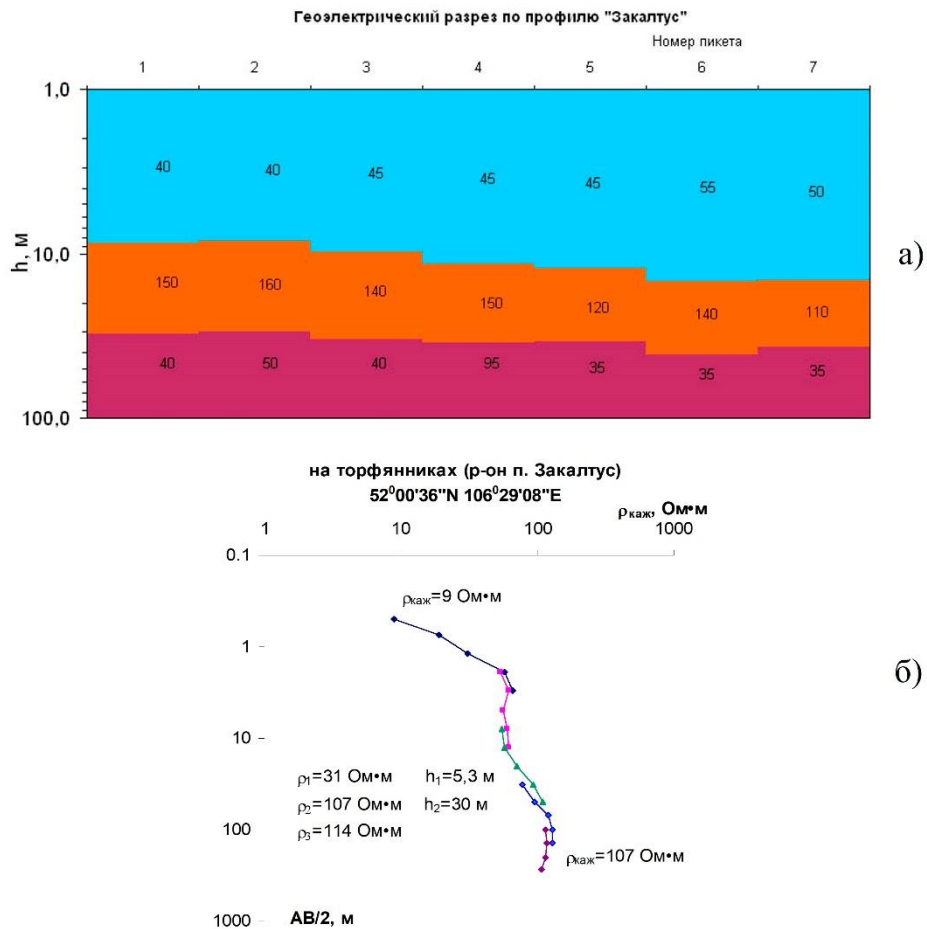


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю «Закалтус» (а) и кривая вертикального электрического зондирования торфяников (б)

Геоэлектрический разрез на острове «Хлебный» вблизи поселка Селенгинск (рис. б) при сходном типе разреза имеет существенные отличия в величинах удельного электрического сопротивления (УЭС). В разрезе выделяется второй слой высокого для осадочных пород УЭС (от 740 до 2200 Ом·м, в среднем 1300 – 1400 Ом·м) толщиной от 15 до 50 м. Он сложен гравийно-галечниковыми отложениями, по-видимому, содержащими очень мало влаги. Этот интересный эффект очень сухих гравийно-галечниковых отложений отмечен нами ранее также на островах р. Чикой. Типичный геоэлектрический разрез на острове «Хлебный» определен как трехслойный типа К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). Следует отметить, что УЭС грунтовых и поверхностных вод в долинах

Байкальского региона обычно не превышает 50 - 100 Ом·м (рис. 7). Такое низкое УЭС флюидов, содержащихся в почвах и горных породах, свидетельствует об очень малой влажности гравийно-галечниковых отложений. Вероятно, их нахождение в сцементированном состоянии в виде брекчии.

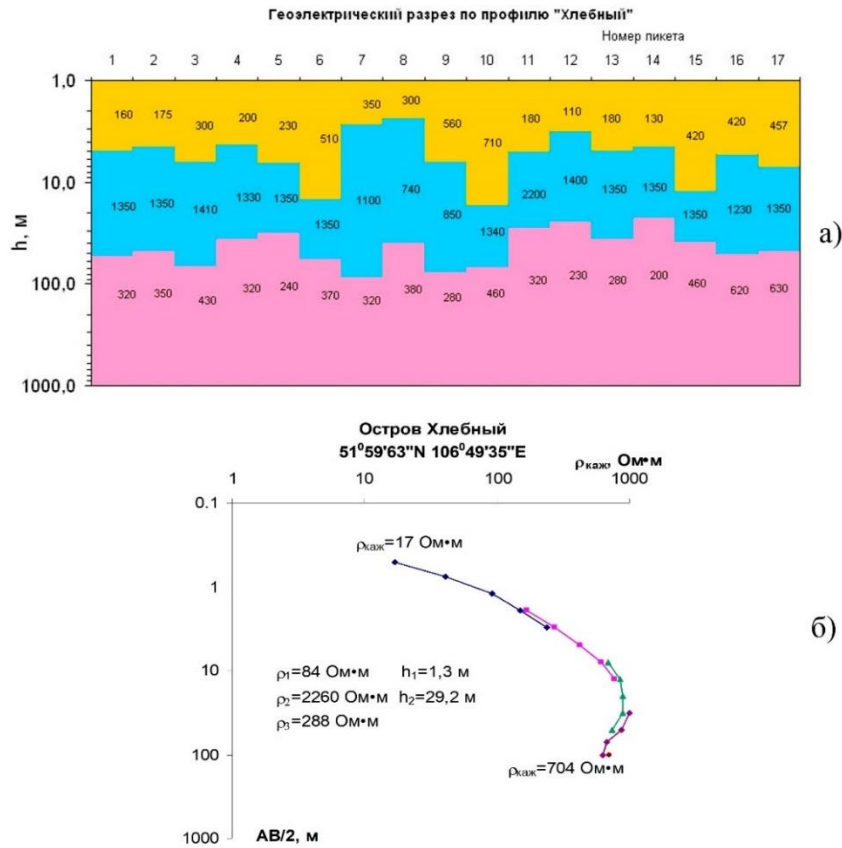


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю «Остров Хлебный» (а) и кривая ВЭС на пикете 11 (б)

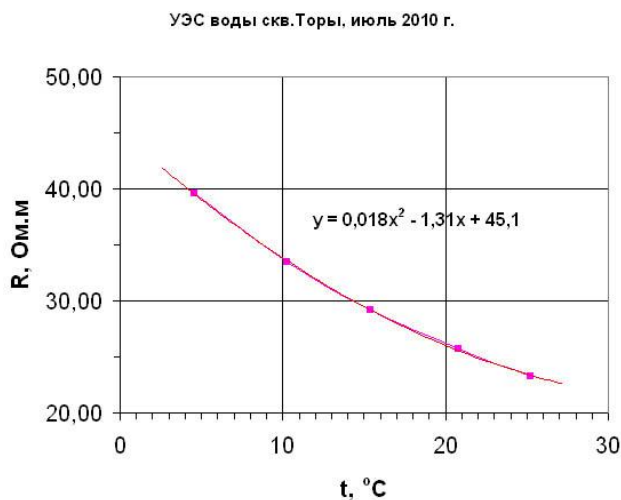


Рис. 7. Температурная зависимость УЭС воды из скважины в обсерватории ИСЗФ СО РАН «Торы» (Тункинская долина)

Близкие результаты радиоимпедансных зондирований осадочных пород в Хоринском, Еравнинском, Заиграевском районах БПТ и данные их интерпретаций приведены в работах [1-4]. На рис. 8 представлены сезонные вариации УЭС проб воды из реки 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 (110 -120 Ом·м) отмечен зимой, а минимум (73-80 Ом·м) – 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%.

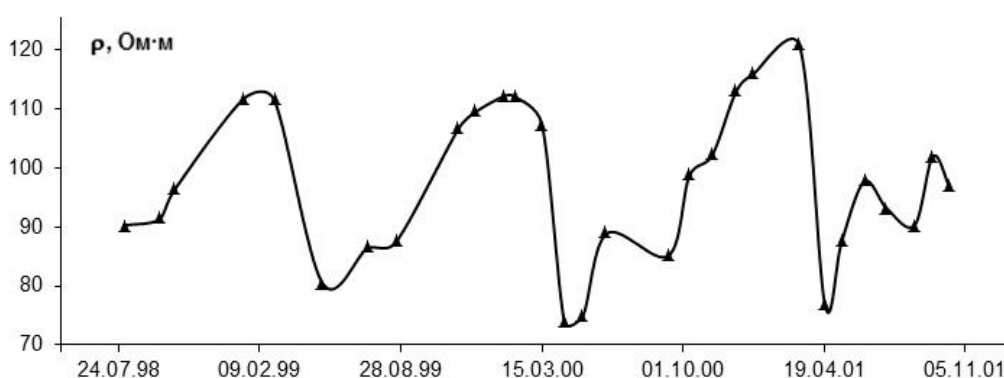


Рис. 8. Сезонные вариации УЭС воды р. Селенга в районе г. Улан-Удэ, приведенные к температуре 15°C

Заключение

Методом радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах радио волн определены удельное электрическое сопротивление (УЭС) и геоэлектрические разрезы (ГЭР) типичных слоисто-неоднородных осадочных пород Байкальской природной территории. Показана эффективность электромагнитных методов для радиоволновой диагностики осадочных пород земной коры. Радиоимпедансное профилирование и зондирование в СДВ-ДВ диапазонах позволяют количественно описать объект исследования, а также обнаружить и локализовать различные типы осадочных пород (грунтов) по изменению импеданса и геоэлектрического разреза. Информация о геоэлектрическом разрезе осадочных пород БПТ может быть использована при инженерно-геологических изысканиях трассы газопровода «Сибирь-Монголия-

Китай», а также при анализе физико-химических условий и причин появления коррозионных процессов на длинных трубопроводных структурах континентальных районов Евразии. Метод радиоимпедансного зондирования может быть применен для измерения электрических свойств различных грунтов БПТ в рамках слоистой модели среды с плохо и хорошо проводящим основанием. Результаты исследования электрических свойств осадочных горных пород в СДВ-ДВ диапазонах радиоволн в целом привели к созданию банка данных [1-4] электрических свойств осадочных пород земной коры, учитывающих неоднородно-слоистую структуру земной толщи. Эти данные необходимы при изучении трассы газопровода «Сибирь-Монголия-Китай» в сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне.

Финансирование: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-787 на реализацию крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Литература

1. Цыдыпов Ч.Ц., Цыденов В.Д., Башкуев Ю.Б. *Исследование электрических свойств подстилающей среды*. Новосибирск, Наука. 1979. 176 с.
2. Доржиев В.С., Адвокатов В.Р., Бодиев Б.Б. *Геоэлектрические разрезы юга Сибири и Монголии*. Москва, Наука. 1987. 94 с.
3. Башкуев Ю.Б. *Электрические свойства природных слоистых сред*. Новосибирск, Издательство СО РАН. 1996. 207 с.
4. 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., Бернгардт О.И. и др. *Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне*. Новосибирск, Издательство СО РАН. 2012. 304 с.

5. Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева, Л.Х., Буянова Д.Г. *Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне*. Улан-Удэ, Издательство БНЦ СО РАН. 2006. 257 с.
6. Ефремов В.Н. *Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов*. Якутск, Издательство ИМЗ СО РАН. 2013. 204 с.
7. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Комплексование георадарных и радиоимпедансных зондирований в Байкальской рифтовой зоне. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т.10ю №3. С.603-620. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0429>
8. Башкуев Ю.Б., Адвокатов В.Р., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г., Ангархаева Л.Х. Электромагнитные характеристики акватории оз. Байкал. *Геология и геофизика*. 1993. Т.34. №9. С.118-126.
9. 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* [электронный журнал]. 2017. №5. <http://jre.cplire.ru/jre/may17/10/text.pdf>
10. Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., Angarkhaeva L.Kh, Boloev V.P., 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. №4-9. P.210-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.030>
11. Тулохонов А.К., Гармаев Е.Ж., Башкуев Ю.Б., Ломухин Ю.Л., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Слипечук М.В., Доржиев Б.Ч., Очиров О.Н. Радиофизический мониторинг ледового покрова озера Байкал. *География и природные ресурсы*. 2018. №1. С.73-80. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1\(73-80\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(73-80))
12. Нагушлаева И.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Сезонные и пространственные изменения суточных вариаций ОНЧ импульсного потока естественного электромагнитного поля, регистрируемые на средних широтах.

Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т.56. №3. С.380-385.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016030147>

13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2002610893 Ангархаева Л.Х. *Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования.* Дата заявки: 11.04.2002. Дата регистрации: 06.06.2002.
14. Вешев А.В., Егоров В.А. Метод определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости горных пород с использованием электромагнитных полей радиостанций. *Электросвязь.* 1968. №7. С.56-62.
15. Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Яковлев А.В., Алексеев Е.П. Аэроэлектроразведочная аппаратура РЭМП и результаты ее полевых испытаний. *Геофизическая аппаратура: сборник научных статей.* Ленинград, Недра. 1981. Вып.73. С.77-87.
16. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations. *Near Surface Geophysics.* 2008. V.6. №4. P.245-252. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2008019>
17. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Controlled source radiomagnetotellurics: A tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics.* 2017. V.146. P.228-237. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.017>
18. Tezkan B., Muttaqien I., Saraev A. Mapping of buried faults using the 2D modelling of far-field controlled source radiomagnetotelluric data. *Pure and Applied Geophysics.* 2019. V.176. №2. P.751-766. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1980-0>
19. Shlykov A., Saraev A., Tezkan B. Study of a permafrost area in the Northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics. *Pure and Applied Geophysics.* 2020. V.177. №12. P.5845-5859. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02621-x>
20. Saraev A.K., Shlykov A.A., Tezkan B. Application of the controlled source radiomagnetotellurics (CSRMT) in the study of rocks overlying kimberlite pipes in

Yakutia/Siberia. *Geosciences*. 2022. V.12. №1. P.34.

<https://doi.org/10.3390/geosciences12010034>

21. Сараев А.К., Антащук К.М., Еремин И.С. Возможности аудиомагнитотеллурических зондирований с бесконтактными электрическими линиями при изучении геоэлектрического строения полуострова Рыбачий (Мурманская область). *Криосфера Земли*. 2018. Т.22. №5. С.65-76.

22. Shlykov A., Saraev A., Agrahari S. Studying vertical anisotropy of a horizontally layered section using the controlled source radiomagnetotellurics: an example from the North-Western region of Russia. *Geophysica*. 2019. V.54. №2. P.3-21.

Для цитирования:

Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства и геоэлектрический разрез некоторых осадочных горных пород Байкальской природной территории по данным радиоимпедансных зондирований. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.5>