



## GEORADAR AND RADIOIMPEDANCE DIAGNOSTICS OF THE SELENGA RIVER WATER AREA

V.B. Khaptanov , Yu.B. Bashkuev , M.G. Dembelov , I.B. Naguslaeva 

Institute of Physical Materials Sciences, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanovoy St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

**ABSTRACT.** The relevance of the work is determined by the fact that no radiowave methods have ever been used to study the water areas of rivers and lakes and their geoelectric sections within the Baikal natural territory (BNT) in winter time. The purpose of the research is to determine the electrical and geometric characteristics of the layered medium "ice – water – bottom soil" and the ice cover of the Selenga River on the BNT in the VLF-LF and VHF radio wave bands according to the data of instrumental radiophysical measurements by GPR and radio impedance methods, including the determination of the structure of the ice crossings over the Selenga River. Using the Selenga River as an example, consideration has been given to the results of combining VLF-LF and VHF methods of electromagnetic diagnostics of a layered medium in a wide range of radio waves (from tens of kilohertz to units of gigahertz). Radio impedance profiling and sounding in the VLF-LF bands with the IPI-300 equipment made it possible to determine the sub-bottom structure of the soil from the change in impedance and geoelectric section. GPR in the VHF band made it possible to differentiate the fine structure of the Selenga River in winter by thickness of snow, ice and water. The sounding involved the use of georadar "Oko-2" with antenna units "Triton" (central frequency 50 MHz), AB-400 (central frequency 400 MHz), AB-700 (central frequency 700 MHz), and AB-1700 (central frequency 1700 MHz). The thickness of ice of the road crossing in the Mostovoy microdistrict of Ulan-Ude city was 0.5–1.2 m – 0.1–0.2 m thicker than that beyond the road crossing. It was found that the presence of snow cover beyond the road crossing prevents the ice mass from freezing. Calibration sounding of ice with borehole drilling yielded ice dielectric constant  $\epsilon=3.17$ . The specific electrical resistance (SER) of water from boreholes is 71–74 Ohm·m at a temperature of 1 °C. The methods used complement each other and provide a quantitative description of the object of research. The integration of various methods of radio wave diagnostics provides more detailed information on the structure of the layered medium "ice – water – bottom soil". The obtained results and the developed methods of radio impedance and GPR sounding and profiling of an inhomogeneously layered underlying environment in winter time can be used in engineering and geological surveys in the eastern and northern regions of Russia.

**KEYWORDS:** georadar; radioimpedance sounding; surface impedance; geoelectric section; ice cover; diagnostics; ice crossing; sub-bottom soil, dielectric permeability; specific electrical resistance; layered medium

**FUNDING:** The work was done as part of the state assignment on the subject 0270-2021-0004 "Development of Fundamentals for ELF-VLF-LF-MF and VHF Radio Wave Propagation in Inhomogeneous Impedance Channels".

## SHORT COMMUNICATION

Received: September 27, 2021

Revised: December 21, 2021

Accepted: January 11, 2022

**Correspondence:** Valery B. Khaptanov, [vkhaptanov@mail.ru](mailto:vkhaptanov@mail.ru)

**FOR CITATION:** Khaptanov V.B., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Naguslaeva I.B., 2022. Georadar and Radioimpedance Diagnostics of the Selenga River Water Area. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0643. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0643

## ГЕОРАДАРНАЯ И РАДИОИМПЕДАНСНАЯ ДИАГНОСТИКА АКВАТОРИИ РЕКИ СЕЛЕНГИ

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

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

**АННОТАЦИЯ.** Актуальность работы определяется тем, что в пределах Байкальской природной территории (БПТ) исследования акваторий рек и озер в зимнее время и их геоэлектрических разрезов радиоволновыми методами почти не проводились. Цель исследований – определение электрических и геометрических характеристик слоистой среды «лед – вода – донный грунт» и ледяного покрова р. Селенги на БПТ в СДВ-ДВ и УКВ диапазонах радиоволн по данным инструментальных радиофизических измерений георадиолокационным (георадарным) и радиоимпедансным методами, в том числе определение структуры ледовых переправ через р. Селенгу. На примере р. Селенги рассмотрены результаты комплексирования СДВ-ДВ и УКВ методов электромагнитной диагностики слоистой среды в широком диапазоне радиоволн (от десятков килогерц до единиц гигагерц). Радиоимпедансное профилирование и зондирование в СДВ-ДВ диапазонах аппаратурой ИПИ-300 позволило по изменению импеданса и геоэлектрического разреза определить поддонную структуру грунта. Георадиолокация в УКВ диапазоне дала возможность дифференцировать тонкую структуру акватории р. Селенги в зимнее время по толщине снега, льда и воды. Для зондирования использован георадар «Око-2» с антенными блоками «Тритон» (центральная частота 50 МГц), АБ-400 (центральная частота 400 МГц), АБ-700 (центральная частота 700 МГц) и АБ-1700 (центральная частота 1700 МГц). Толщина льда на ледовой переправе в микрорайоне Мостовом г. Улан-Удэ составляла 0.5–1.2 м и превышала толщину льда за пределами переправы на 0.1–0.2 м. Установлено, что наличие снежного покрова за пределами переправы сдерживает промерзание ледовой толщи. Калибровочное зондирование льда с бурением скважины дало диэлектрическую проницаемость льда  $\epsilon=3.17$ . Удельное электрическое сопротивление воды из скважин составляет 71–74 Ом·м при температуре 1 °С. Используемые методы дополняют друг друга и позволяют количественно описать объект исследования. Комплексирование различных методов радиоволновой диагностики дает более подробную информацию о структуре слоистой среды «лед – вода – донный грунт». Полученные результаты и разработанные методики радиоимпедансного и георадарного зондирования и профилирования слоисто-неоднородной подстилающей среды в зимнее время могут быть использованы при инженерно-геологических изысканиях в восточных и северных районах России.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** георадар; радиоимпедансное зондирование; поверхностный импеданс; геоэлектрический разрез; ледяной покров; диагностика; ледовая переправа; поддонный грунт; диэлектрическая проницаемость; удельное электрическое сопротивление; слоистая среда

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0270-2021-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках государственного задания по теме 0270-2021-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах» в зимний период 2021 г. полевой отряд в составе пяти сотрудников лаборатории электромагнитной диагностики ИФМ СО РАН провел георадарную и радиоимпедансную диагностику акватории р. Селенги, в том числе георадарное обследование единственной официальной ледовой переправы через р. Селенгу в микрорайоне Мостовом Железнодорожного района г. Улан-Удэ. В 3 км ниже по течению находится железнодорожный мост через р. Селенгу, давший название железнодорожной станции, микрорайону и ледовой переправе в зимнее время. Ледовая переправа протяженностью 400 м действует в течение 2.5 месяцев с конца декабря до середины марта, сокращая дорожное сообщение с городом на 100 км. Ввод

в эксплуатацию, сроки действия и соответствие нормативным документам для ледовых переправ находятся под надзором МЧС [Industry Road Rules, 1998].

Целью исследований является определение электрических и геометрических характеристик слоистой среды «лед – вода – донный грунт» и ледяного покрова р. Селенги на Байкальской природной территории (БПТ) в СДВ-ДВ и УКВ диапазонах радиоволн по данным инструментальных радиофизических измерений георадиолокационным (георадарным) и радиоимпедансным методами, в том числе определение структуры ледовых переправ через р. Селенгу.

Решаемые задачи:

– Георадарная диагностика русла р. Селенги, ее ледяного покрова в УКВ диапазоне.

– Радиоимпедансная диагностика русла р. Селенги в зимнее время в СДВ-ДВ диапазонах. Восстановление геоэлектрического разреза русла р. Селенги при наличии

ледяного покрова по измеренной частотной зависимости поверхностного импеданса.

– Совместная интерпретация данных георадарно-го и радиоимпедансного зондирования для определения электрических и геометрических характеристик русла р. Селенги и ее ледяного покрова.

## 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА Р. СЕЛЕНГИ

Селенга – река в азиатской части России, в Республике Бурятия, а также в Монголии [Smakhtin, 2015; Bandeeva, Garmaev, 2013]. Селенга берет начало на территории Монголии при слиянии рек Идэр и Дэлгэн-Мурен, впадает в озеро Байкал. Длина реки 1024 км (40 % на территории России), площадь бассейна 447 тыс. км<sup>2</sup> (33 % на территории России). Это крупнейшая по длине и площади бассейна река водосбора озера Байкал. Наиболее крупные притоки на территории Монголии – Орхон (правый), Эгийн-Гол (левый); на территории России – Чикой, Хилок, Уда (правые), Джига (левый). На территории России река пересекает горную область Селенгинской Даурии, ниже г. Улан-Удэ – хр. Хамар-Дабан. Долина реки представляет собой чередование сужений и расширений, обусловленных наличием межгорных котловин. В расширениях русло широкопойменное, со сложными сопряженными разветвлениями и пойменной многоруканностью, в сужениях врезанное, беспойменное. При пересечении хр. Хамар-Дабан река протекает в едином русле в высоких берегах (высота 20–40 м). Средний уклон 0.34 ‰. Среднемноголетний объем стока 28.752 км<sup>3</sup>/год. Питание реки преимущественно дождевое. Водный режим соответствует дальневосточному типу, характеризуется слабовыраженным весенним половодьем и высокими летними паводками. Большая часть стока проходит в летний период (42 %). Весенний сток составляет 29 %, осенний – 26 %, зимой проходит только 3 % общего стока реки. Максимальный расход воды составляет 7620 м<sup>3</sup>/с. Зимний сток незначителен. Минимальный зимний расход воды – 30.6 м<sup>3</sup>/с. Средний размах сезонных колебаний уровня воды 2.6–4.0 м. Ледовые явления начинаются в третьей декаде октября, через 2–3 дня начинается осенний ледоход, продолжающийся до семи суток. Ледяной покров обычно возникает в конце первой декады ноября. Весеннее вскрытие реки приурочено ко второй половине третьей декады апреля. После непродолжительного ледохода (до трех суток) река освобождается ото льда к концу апреля. Общая продолжительность ледовых явлений составляет 188 суток. Средняя мутность реки равна 74 г/м<sup>3</sup>, расход взвешенных наносов – 68 кг/с. К вершине дельты ежегодно поступает около 2.2 млн т наносов. Минерализация воды в период повышенных расходов достигает 50 мг/л. По химическому составу она относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. В речной воде повышено содержание сульфатов. Качество воды соответствует качеству загрязненных рек и ухудшается ниже городов и районов

расположения сбросов сточных вод на территории Монголии и России.

## 3. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Радиоимпедансные зондирования выполнены измерителем поверхностного импеданса ИПИ-300 на частотах радиостанций СДВ-ДВ диапазона, принимаемых в районе исследования и характеризующихся достаточно высоким уровнем поля и стабильным режимом работы [Bashkuev et al., 2019, 2020]. При обработке зондирований использована программа «Импеданс» [Angarkhaeva, 2002]. Выполнение измерений на акваториях рек и озер БПТ проведено по ледовому покрову в зимне-весеннее время. На пунктах измерения производилось бурение льда с определением его толщины, кондуктометрией и батиметрией водной толщи. Для определения толщины льда, глубины и удельного электрического сопротивления (УЭС) слоя воды на профилях производилось бурение льда. Температурная зависимость УЭС проб воды определялась комплектом датчиков УК-0.2/1 от кондуктометра ММЗЧ-0.41 совместно с LCR-метром АМ-3003. Глубина воды определялась лотом.

Для георадарного исследования использован радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-2» с антенными блоками АБДЛ «Тритон», АБ-400, АБ-700, АБ-1700, имеющими центральные частоты спектра зондирующего импульса 50, 400, 700 и 1700 МГц соответственно [ОКО-2..., 2009]. Глубина зондирования зависит от электрических свойств среды. Для акваторий определяющим фактором является УЭС (проводимость) воды. Для пресноводных водоемов глубина зондирования с низкочастотным блоком АБДЛ «Тритон» может превышать 10 м [ОКО-2..., 2009]. Для проведения измерений, интерпретации и визуализации данных георадарных зондирований использован программный пакет компании «Логические системы» (г. Москва) Geoscan32 [GeoScan32, 2009]. При этом в полной мере учитывался опыт георадиолокационных исследований водоемов в летнее и зимнее время [Vladov, Starovoytov, 2004; Starovoytov, 2008; Omelyanenko, Khristoforov, 2012; Denisov, Kapustin, 2010].

## 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. Георадарное обследование ледовой переправы через р. Селенгу

Калибровочное зондирование льда с бурением скважины дало диэлектрическую проницаемость льда  $\epsilon = (c \Delta T / 2h)^2 = 3.17$ , где  $c = 3$  м/нс – скорость света,  $h = 0.585$  м – толщина льда,  $\Delta T = 6.94$  нс – время прохождения зондирующего импульса от верхней до нижней кромки льда и обратно (рис. 1, а). На рис. 1, б, представлены данные по УЭС пробы воды, взятой из скважины. От данного параметра зависит затухание электромагнитного импульса в водной среде и глубина зондирования. УЭС пробы воды р. Селенги из скважины составляет 74 Ом·м при температуре 1 °С, что в



два раза меньше УЭС байкальской воды [Bashkuev et al., 1993].

На рис. 2 представлена схема георадарных профилей, выполненных в районе ледовой переправы через р. Селенгу в микрорайоне Мостовом г. Улан-Удэ. Основной георадарный профиль выполнен вдоль ледовой переправы по линии АВ с антенным блоком АБ-400 (рис. 2).

Глубинность георадара «Око-2» с АБ-400 с центральной частотой зондирующего импульса 400 МГц [Bashkuev et al., 2019, 2020] дает возможность зондировать ледовую переправу до самого дна русла реки. Кроме того, для более точного определения толщины ледовой переправы были выполнены профили с высокочастотным антенным блоком АБ-1700 с центральной частотой спектра зондирующего импульса 1700 МГц:

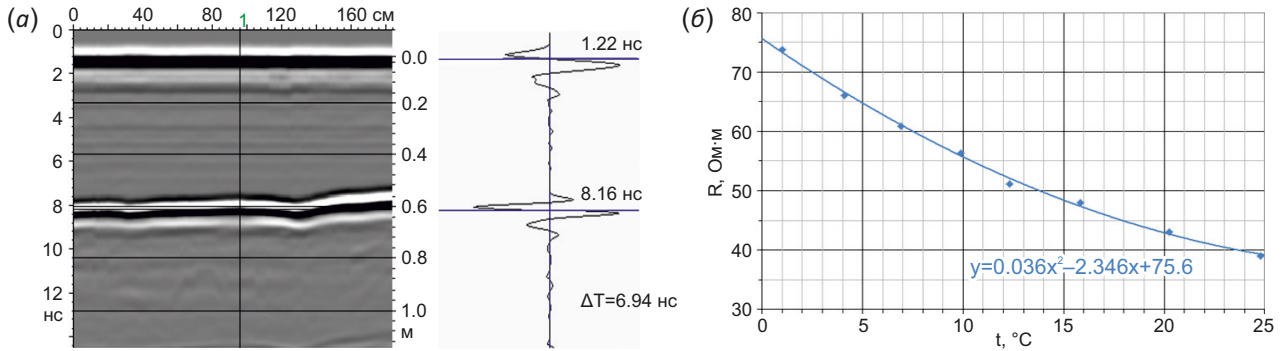


Рис. 1. Скважина на ледовой переправе микрорайона Мостового на р. Селенге. (а) – калибровочное зондирование льда с бурением скважины (метка 1), (б) – УЭС пробы воды из скважины.

Fig. 1. Borehole on the Mostovoy ice crossing over the Selenga River. (a) – calibration sounding of ice with drilling a borehole (mark 1), (б) – resistivity of the water sample from the borehole.

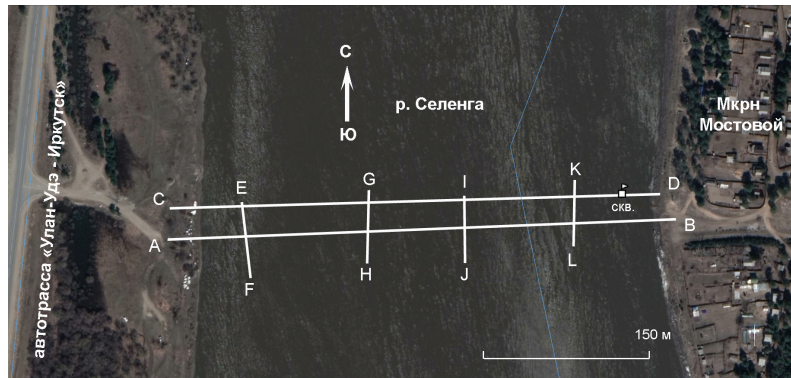


Рис. 2. Расположение ледовой переправы на фрагменте спутникового снимка (Google Earth). Схема георадарных профилей вдоль и поперек переправы.

Fig. 2. The location of the ice crossing on fragment of the satellite image (Google Earth). Diagram of GPR profiles along and over the crossing.

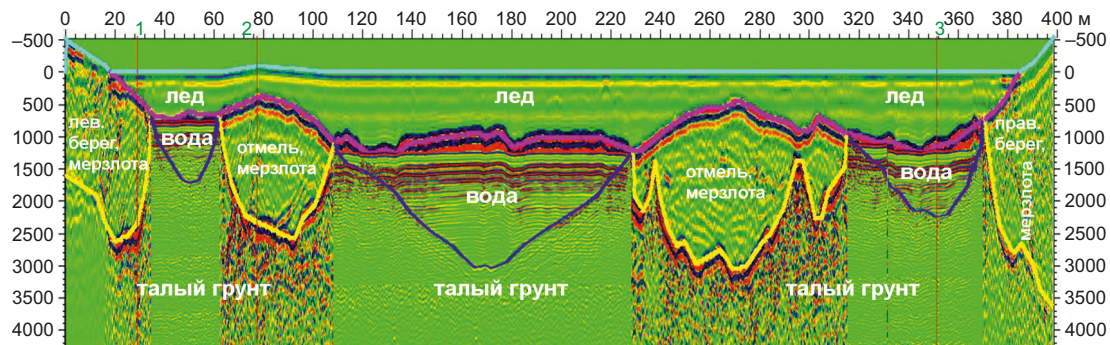


Рис. 3. Радарограмма по профилю АВ на частоте 400 МГц с послойной интерпретацией.

Fig. 3. Radarogram along the AB profile at 400 MHz with layer-by-layer interpretation.

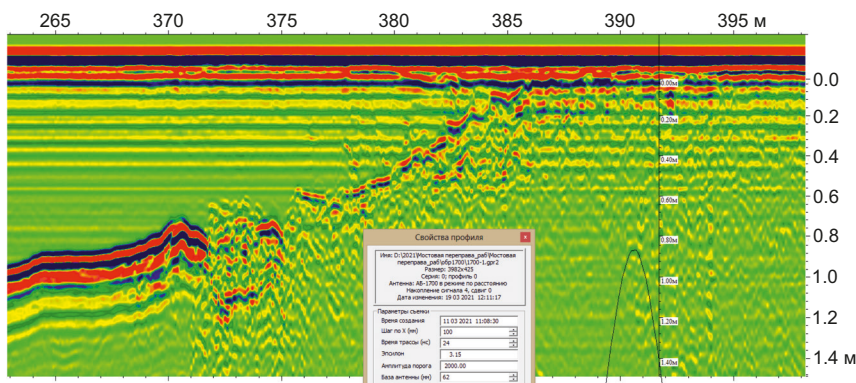


Рис. 4. Радарограмма с «гиперболой» одиночного объекта в толще мерзлого грунта левобережной отмели. Георадар «Око-2». Антенный блок АБ-1700.

Fig. 4. Radarogram with a "hyperbola" of a single object in the frozen ground of the left bank shallow. Georadar "Oko-2". Antenna unit AB-1700.

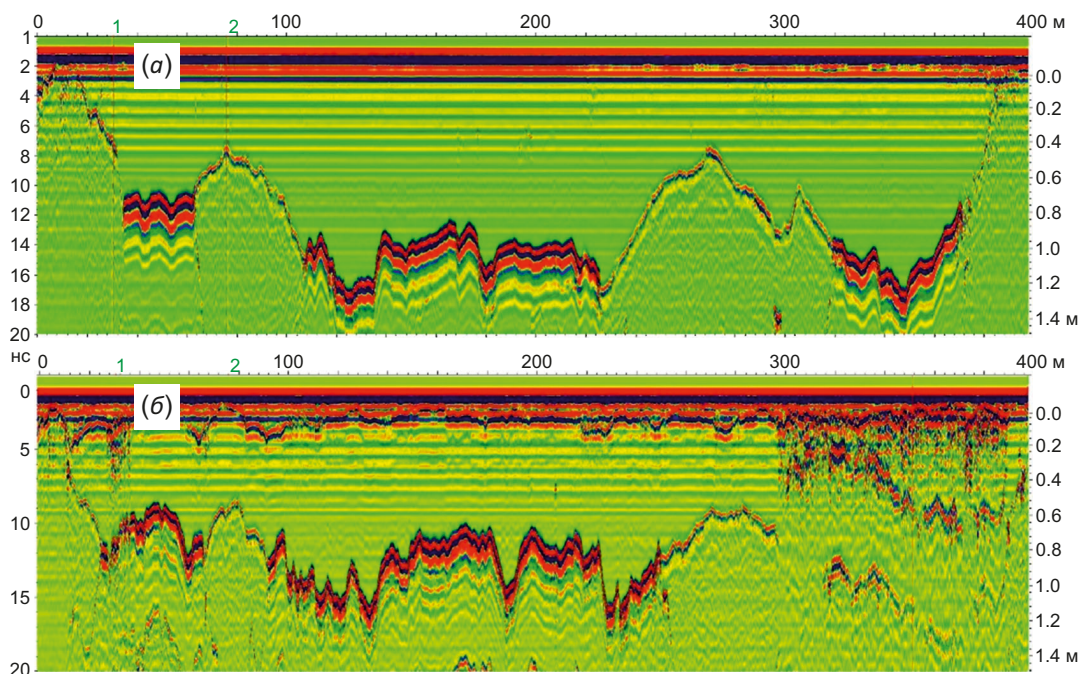


Рис. 5. Радарограммы ледяного покрова: по профилю АВ (а) – ледовая переправа и CD (б) – 25 м ниже по течению от переправы на частоте 1700 МГц.

Fig. 5. Radarograms of the ice cover along profiles: AB (a) – ice crossing and CD (b) – 25 m downstream of the crossing at a frequency of 1700 MHz.

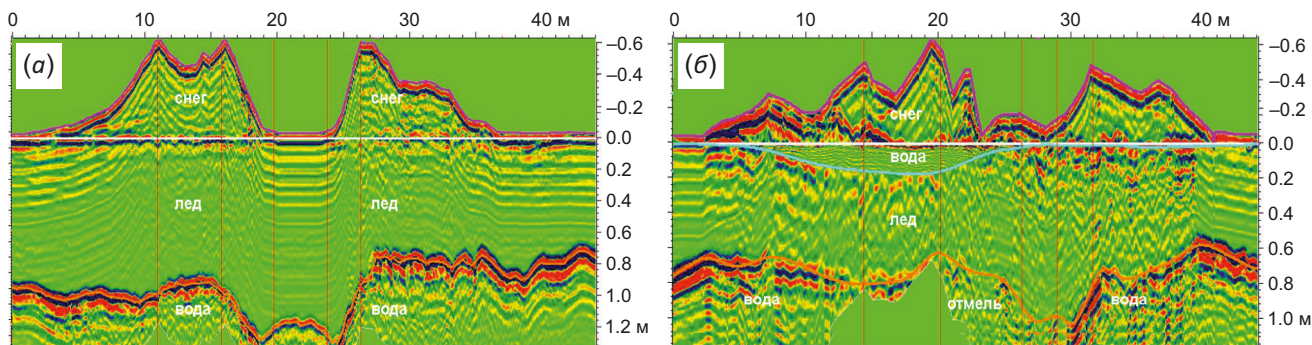


Рис. 6. Радарограммы ледяного покрова по поперечным профилям IJ (а) и KL (б).

Fig. 6. Ice sheet radarograms along the cross-sections IJ (a) and KL (b).



по основной линии АВ; по линии СD, на 25 м ниже по течению от ледовой переправы; четыре поперечных профиля EF, GH, IJ и KL (рис. 2).

На рис. 3 приведена радарограмма по профилю АВ на частоте 400 МГц с послойной интерпретацией.

Как видно из радарограммы, толщина ледового покрова с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=3.17$  достигает 1.2 м, уменьшаясь до 0.5 м на промерзших левобережной и правобережной отмелях. На левобережной отмели наблюдается пучение льда. Речная вода с  $\epsilon=81$  включает под ледовой переправой три потока: левобережный 35–63 м профиля АВ, центральный 108–228 м профиля и правобережный 315–370 м. Глубина русла речных потоков составляет 1.6, 3.0 и 2.3 м соответственно. На отмелях левого и правого берега вода промерзла до дна и георадар фиксирует глубину промерзания отмелей до 2.5 м возле левого берега и 3 м у правого берега. Глубина промерзания грунта достигает 2.5 м на левом берегу и 3.5 м – на правом берегу р. Селенги. При послойной интерпретации по результатам зондирования одиночных объектов толщи льда и мерзлого грунта отмелей и берега было принято, что диэлектрическая проницаемость льда и мерзлого грунта близки по значению при сравнении «гипербол» одиночных объектов (рис. 4). Косвенное свидетельство этого – слабая контрастность границы между льдом и промерзшим грунтом берега на радарограмме.

На рис. 5 приведены для сравнения радарограммы, выполненные по профилям АВ (ледовая переправа) и СD (25 м ниже по течению от переправы).

Наблюдается значительная разница в толщине ледяного покрова на ледовой переправе (рис. 5, а) и ниже по течению на 25 м (рис. 5, б). На профиле СD ниже переправы со снежным покровом толщина льда меньше на 0.1–0.3 м. Этот профиль был пройден спустя три дня после сильнейшей бури с 14 на 15 марта 2021 г. В результате образовались снежные заносы на ледовой переправе высотой до 1 м под правым берегом. Под снегом появились проталины, переправа практически стала

непроходимой и 16 марта была закрыта сотрудниками МЧС. На нижней радарограмме видна появившаяся после бури подошва мощного снежного сугроба под правым берегом (рис. 5, б).

Еще более наглядно видно изменение толщины ледяного покрова переправы на поперечном профиле IJ (см. рис. 1; рис. 6, а). На рис. 6, б, на поперечном профиле KL видно образование под сугробом с северной стороны ледовой переправы проталины с водой.

#### 4.2. Георадарный и импедансный профили у автомобильного моста через р. Селенгу около села Вахмистрово

Комплексные радиоимпедансные и георадарные зондирования русла р. Селенги были проведены в 50 м от автомобильного моста в районе пос. Вахмистрово (рис. 7).

Основной целью исследований было изучение геоэлектрического разреза «лед – вода – донный грунт». Длина профиля составила 340 м. Измерения поверхностного импеданса  $\delta$  выполнены на 12 пикетах на частотах 22.2, 50 и 279 кГц. Интерпретация с учетом данных георадиолокации дала неоднородную 4-слойную структуру геоэлектрического разреза поперек русла реки (рис. 8, а). Георадарное зондирование русла р. Селенги выполнено георадаром «Око-2» с антенными блоками Тритон и АБ-700 на профиле протяженностью 340 м. Большая часть профиля покрыта льдом толщиной 1.0–1.2 м с уменьшением практически до 0 м на берегах и песчаных отмелях. Радарограммы осложнены наличием 3–4-кратных волн из-за переотражений в слабо поглощающем ледяном покрове. На радарограмме с антенным блоком АБ-700 не прослеживается дно русла в наиболее глубокой его части из-за ослабления сигнала. В отличие от радарограммы с АБ «Тритон» (рис. 8, б) радарограмма с АБ-700 (рис. 8, в) дает гораздо более детальную картину ледяного покрова и дна русла реки. При интерпретации радарограммы использованы следующие значения относительной диэлектрической

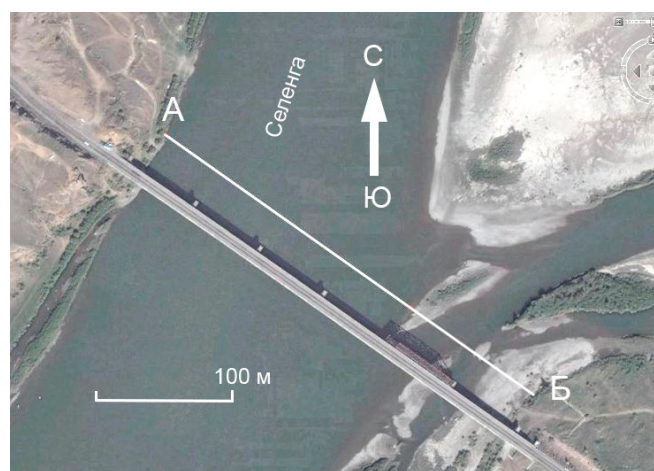
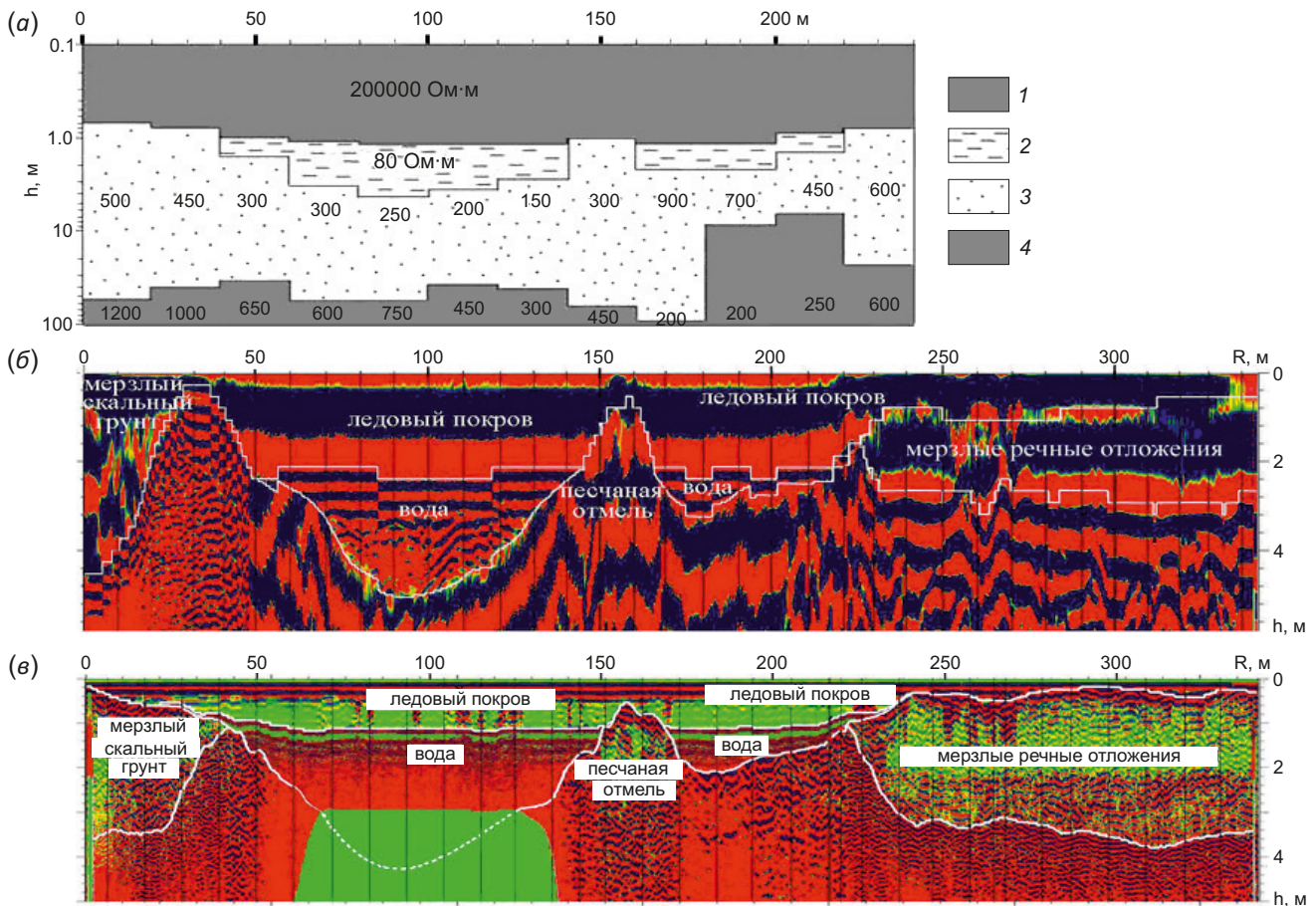


Рис. 7. Расположение профиля измерений на р. Селенге у автомобильного моста около пос. Вахмистрово.

Fig. 7. Location of the measurement profile on the Selenge River at the road bridge near the village of Vakhmistrovo.



**Рис. 8.** Разрез русла р. Селенги по результатам совместной интерпретации радиоимпедансных (а) и георадарных ((б) – АБДЛ «Тритон», (в) – АБ-700) зондирований.

Толщина ледяного покрова и глубина в пунктах зондирования определялась по данным георадиолокации. 1 – лед; 2 – вода; 3 – песчано-гравийные отложения; 4 – гравийно-галечные отложения и кристаллический фундамент.

**Fig. 8.** Section of the Selenga River channel based on the results of joint interpretation of radio impedance (a) and GPR ((б) – ABDL "Triton", (в) – AB-700) soundings.

The thickness of the ice cover and the depth at the sounding points were determined from the data of GPR. 1 – ice; 2 – water; 3 – sand and gravel deposits; 4 – gravel and pebble deposits and crystalline basement.

проницаемости слоев разреза: лед – 3.15, вода – 81, мерзлые рыхлые отложения – 4, донные талые отложения (водонасыщенные) – 20. Максимальная глубина реки по результатам интерпретации радарограммы АБ «Тритон» составляет 4.5 м и совпадает с глубиной, измеренной лотом с поверхности льда через пробуренную скважину. Полученное георадаром детальное строение профиля русла реки в сочетании с измерением скорости потока дает возможность оценить расход воды в реке в зимнее время.

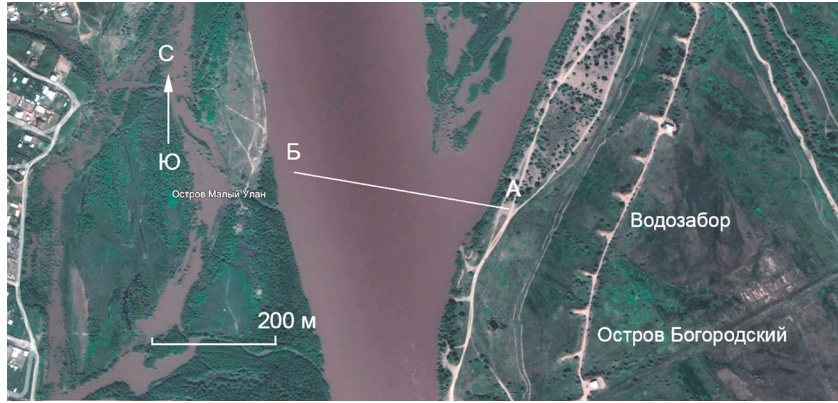
**4.3. Радиоимпедансный профиль в районе станции водозабора г. Улан-Удэ на р. Селенге**

Измерения поверхностного импеданса  $\delta$  в ДВ-диапазоне радиоволн проведены в районе станции водозабора на р. Селенге на профиле длиной 320 м в 17 пунктах наблюдения. Основной целью исследований явилось изучение геоэлектрического разреза «лед – вода – донный грунт», а также обоснование применимости метода радиоимпедансного зондирования для

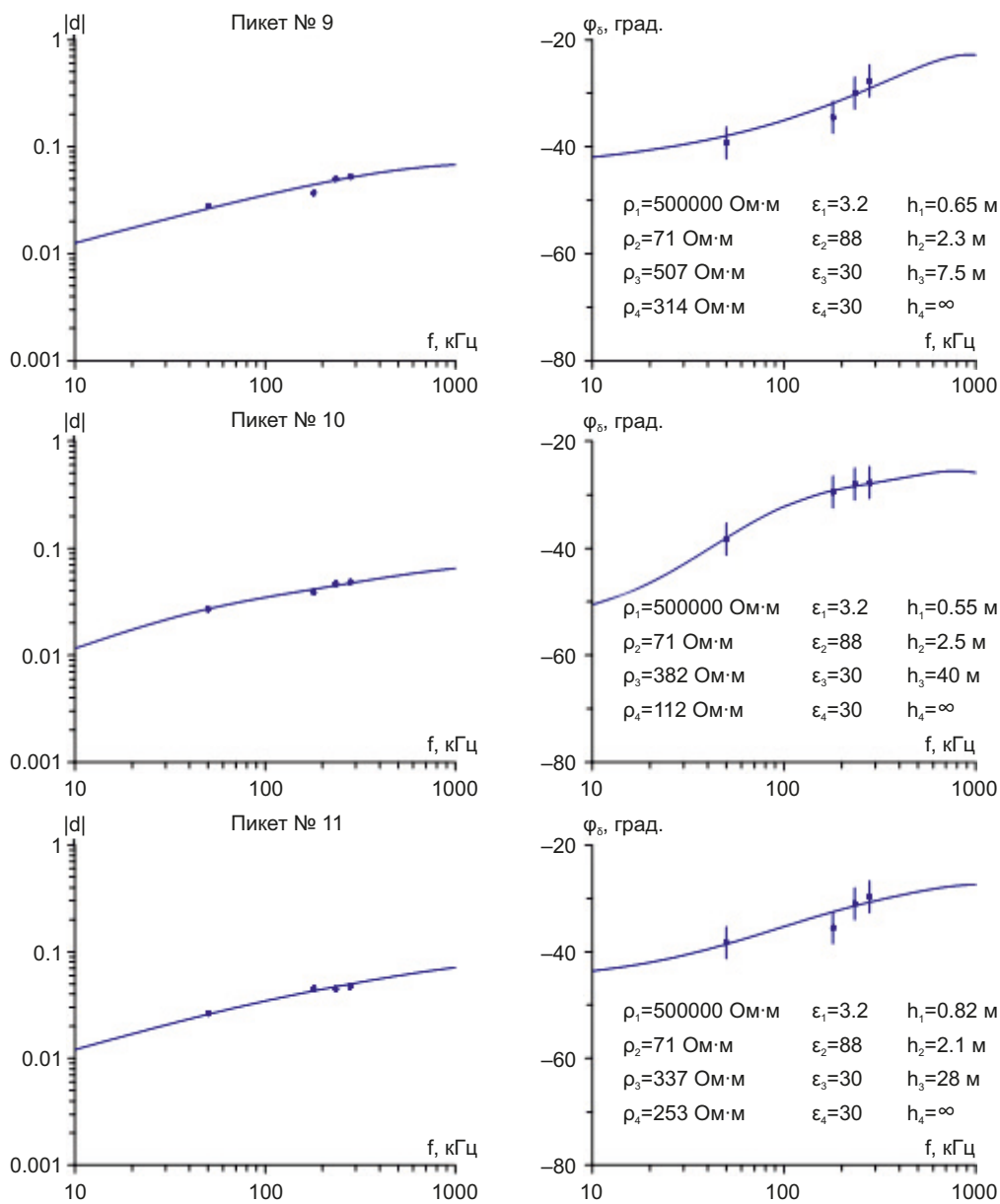
определения электрических и геотехнических параметров акваторий. Источниками поля служили ДВ-радиостанции, характеризующиеся достаточно высоким уровнем поля и стабильным режимом работы. Для определения толщины льда, глубины и УЭС слоя воды на профиле пробурено девять скважин. Начало профиля располагалось на берегу в 40 м от воды. Конец профиля находился в 20 м от другого берега, толщина льда изменялась в пределах от 0.5 до 1.2 м. Профиль проведен перпендикулярно течению. На рис. 9 показано местоположение профиля АБ, по которому производились измерения.

На рис. 10 представлены результаты интерпретации частотных зависимостей  $|\delta|$  и  $\varphi_\delta$  для пунктов зондирования 9, 10, 11 в диапазоне 10–1000 кГц.

Для построения геоэлектрического разреза р. Селенги нами принята горизонтально-слоистая модель ее строения, в которой каждый слой характеризуется неизменными в пределах толщины слоя  $h_j$ , УЭС  $\rho_j$  (проводимостью  $\sigma_j$ ) и относительной диэлектрической

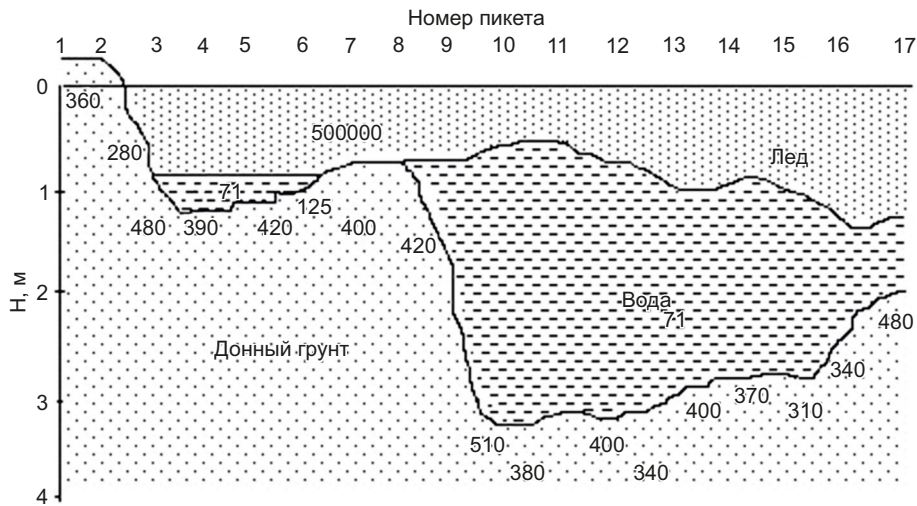


**Рис. 9.** Расположение профиля измерений на р. Селенге в районе станции водозабора г. Улан-Удэ.  
**Fig. 9.** Location of the measurement profile on the Selenga River near the water intake station in Ulan-Ude city.



**Рис. 10.** Результаты интерпретации частотных зависимостей  $|\delta|$  и  $\phi_\delta$  для пунктов зондирования 9, 10, 11 в диапазоне 10–1000 кГц.  
**Fig. 10.** Results of interpretation of frequency dependences  $|\delta|$  and  $\phi_\delta$  for sounding points 9, 10 and 11 in the range of 10–1000 kHz.





**Рис. 11.** Геоэлектрический разрез, полученный на р. Селенге в районе станции водозабора г. Улан-Удэ.  
**Fig. 11.** Geoelectric section obtained on the Selenga River near the water intake station in Ulan-Ude city.

проницаемостью  $\epsilon_j$ . По частотной зависимости модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_\delta$  приведенного поверхностного импеданса  $\delta$  в диапазоне частот 50–279 кГц восстановлен геоэлектрический разрез (ГЭР) р. Селенги: удельное сопротивление  $\rho_j$  и толщина  $h_j$  каждого горизонта. В результате интерпретации данных 17 пунктов зондирования определены наиболее распространенные типы 2- и 3-слойных ГЭР:  $\rho_1 > \rho_2$ ,  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ . При выборе типа ГЭР и количества слоев мы исходили из вида фазовых кривых  $\varphi_\delta$ . Например, наличие сильноиндуктивных значений  $\varphi_\delta$  ( $\text{Im } \delta < 0$ ,  $|\text{Im } \delta| > \text{Re } \delta$ ) указывает на наличие плохо проводящего слоя  $\rho_1 > \rho_2$ . Сплошными линиями показаны частотные зависимости для восстановленных разрезов, точками – измеренные значения импеданса. Теоретические кривые  $|\delta|$  и  $\varphi_\delta$  совпадают с амплитудно-фазовыми экспериментальными данными, что указывает на отсутствие существенных ошибок в построении и интерпретации выбранной модели разреза.

На рис. 11 представлен ГЭР, полученный на основе трехслойной модели, показывающий распределение толщин  $h_{1,2}$  и удельных сопротивлений  $\rho_{1,2,3}$  (на рис. 11 значения  $\rho$  для льда, воды и донного грунта даны в единицах Ом·м) вдоль профиля р. Селенги.

**5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведена георадарная и радиоимпедансная диагностика акватории р. Селенги в районе г. Улан-Удэ. Результаты комплексирования СДВ-ДВ и УКВ методов радиоволновой (электромагнитной) диагностики р. Селенги в зимнее время в широком диапазоне радиоволн (от десятков килогерц до единиц гигагерц) подтвердили высокое качество интерпретации геометрических и электрофизических свойств водной среды [Bashkuev et al., 2019, 2020]. Радиоимпедансное профилирование и зондирование в СДВ-ДВ диапазонах аппаратурой ИПИ-300 позволило по изменению импеданса определить поддонную структуру грунта и геоэлектрический разрез «лед – вода – донный грунт». Георадиолокация

в УКВ диапазоне дала возможность дифференцировать тонкую структуру акватории р. Селенги в зимнее время по толщине снега, льда и воды. Установлено, что толщина льда на ледовой переправе в микрорайоне Мостовом Железнодорожного района г. Улан-Удэ составляла 0.5–1.2 м. Она превышает толщину льда за пределами переправы на 0.1–0.2 м. Показано, что наличие снежного покрова за пределами переправы сдерживает промерзание ледовой толщи. Регулярная очистка ледовой переправы от снежного покрова способствует наращиванию толщины ледовой переправы на 0.1–0.3 м. Калибровочное зондирование льда с бурением скважины дало диэлектрическую проницаемость льда  $\epsilon = 3.17$ . УЭС воды из скважин составляет 71–74 Ом·м при температуре около 1 °С. Радиоволновые измерения на льду р. Селенги помимо мониторинга состояния и толщины льда дают возможность оценивать водность реки в зимнее время. Результаты георадарного и радиоимпедансного обследования дают детальную структуру ледовых переправ, русла р. Селенги и ее состояния на момент исследования. Используемые методы дополняют друг друга и позволяют количественно описать объект исследования. Комплексирование различных методов радиоволновой диагностики дает более подробную информацию о структуре слоистой среды «лед – вода – донный грунт». Полученные результаты и разработанные методики радиоимпедансного и георадарного зондирования и профилирования слоисто-неоднородной подстилающей среды в зимнее время могут быть использованы при инженерно-геологических изысканиях акваторий в восточных и северных районах России.

**6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
 The authors contributed equally to this article.

## 7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

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. ROSPATENT, 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].

Bandeeva A.B., Garmaev E.Zh., 2013. Features of Winter Flow Formation of Transbaikalian Rivers. Bulletin of the Buryat State University 4, 28–30 (in Russian) [Бандеева А.Б., Гармаев Е.Ж. Особенности формирования зимнего стока рек Забайкалья // Вестник Бурятского государственного университета. 2013. № 4. С. 28–30].

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 34 (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. Т. 34. № 9. С. 118–126].

Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G., 2019. Integration of the GPR and Radio-Impedance Techniques in Studies of the Baikal Rift Zone. Geodynamics & Tectonophysics 10 (3), 603–620 (in Russian) [Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Комплексирование георадарных и радиоимпедансных зондирований в Байкальской рифтовой зоне // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 603–620]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0429>.

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 (in Russian) [Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Геоэлектрический разрез Баргузинского залива на оз. Байкал по данным георадарных и радиоимпедансных

зондирований // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 4. С. 806–816]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0508>.

Denisov R.R., Kapustin V.V., 2010. Computerized Georadar Data Processing. Geophysics 4, 76–80 (in Russian) [Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010. № 4. С. 76–80].

GeoScan32, 2009. "ОКО-2" Georadar Control Program and Data Visualization: Illustrated User Guide [GeoScan32: программа управления Георадаром «ОКО-2» и визуализации получаемых данных: Руководство пользователя. Available from: <http://www.logsys.ru> (Last Accessed March 3, 2019).]

Industry Road Rules, 1998. Public Roads. Guidelines for the Design, Construction, and Operation of Ice Crossings. ODN 218.010-98. Moscow, 75 p. (in Russian) [Отраслевые дорожные нормы. Автомобильные дороги общего пользования. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ: ОДН 218.010-98. М., 1998. 75 с.].

ОКО-2 Radio-Technical Device of Subsurface Sounding, 2009. Technical Description. User Manual. Logic Systems, Moscow, 94 p. (in Russian) [Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2»: Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. М.: Логические системы, 2009. 94 с.].

Omelyanenko A.V., Khristoforov I.I., 2012. Features GPR Moist Environments. Mining Informational and Analytical Bulletin 9, 127–132 (in Russian) [Омельяненко А.В., Христофоров И.И. Особенности георадиолокации обводненных сред // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 9. С. 127–132].

Smakhtin V.K., 2015. The Influence of Climate Change on Hygrological Regime of the Transbaikalian Rivers. Brief PhD Thesis (Candidate of Geography). Chita, 131 p. (in Russian) [Смахтин В.К. Влияние изменения климата на гидрологический режим рек Забайкалья. Дис. ... канд. геогр. наук. Чита, 2015. 131 с.].

Starovoytov A.V., 2008. Interpretation of GPR Data. Textbook. MSU Publishing House, Moscow, 192 p. (in Russian) [Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.].

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