

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.3(571)+621.371

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(88-96)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПОБЕРЕЖЬЕ
МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ РАДИОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

*Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия; buddich@mail.ru*

Представлены результаты изучения геоэлектрического разреза мерзлых горных пород арктического побережья в окрестностях пос. Тикси. Предложена методика изучения массивов горных пород криолитозоны с помощью комплекса радиоволновых методов интроскопии подстилающей слоисто-неоднородной среды: сверхдлинноволнового, длинно- и средневолнового радиоимпедансного зондирования и очень высокочастотной–ультравысокочастотной георадиолокации. В исследованном районе геоэлектрические разрезы массивов горных пород отличаются большим разнообразием из-за разного сопротивления мерзлых рыхлых отложений в отдельных горизонтах за счет изменения литологии, гранулометрического состава, появления повторно-жильных льдов и изменения минерализации подземных вод, а также за счет наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод. Комплексная интерпретация радиоимпедансного и георадарного зондирования позволила получить подробную информацию о геоэлектрическом строении приповерхностной части земной коры арктического побережья в окрестностях пос. Тикси. Выявлены участки развития криопэггов в массивах горных пород в районе бухты Тикси моря Лаптевых и установлены их электрические свойства. Результаты исследования электрических свойств криогенных сред в области низких и средних радиочастот в целом привели к созданию банка данных электрических свойств криолитозоны с учетом слоистой структуры земной толщи.

*Геоэлектрический разрез, радиоимпедансное зондирование, георадиолокация, криопэгги*ELECTRICAL PROPERTIES OF PERMAFROST IN THE LAPTEV SEA COAST:
EVIDENCE FROM RADIO-WAVE MEASUREMENTS

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

Institute of Physical Materials Sciences, SB RAS, 6, Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russia; buddich@mail.ru

The electrical properties of permafrost in the Arctic coast near the Tiksi Bay have been studied by VLF to MF radio-frequency impedance soundings combined with VHF–UHF georadar surveys. The subsurface in the area shows heterogeneous geoelectrical patterns with variations according to lithology and particle size distribution. More heterogeneity is due to the presence of ice wedges and lenses of saline groundwater (cryopegs), as well as to flow of supra- and intra-permafrost waters. Joint interpretation of radio-frequency impedance and GPR data provide constraints on the shallow subsurface structure in the Arctic coast in the vicinity of Tiksi and on particular electrical properties of cryopegs. The properties of permafrost revealed by surveys at low and medium RF bands are included into the geoelectrical database for layered permafrost.

Geoelectrical section, radio impedance sounding, ground-penetrating radar, cryopegs

ВВЕДЕНИЕ

Район исследований относится к зоне многолетней мерзлоты. Здесь на побережье Северного Ледовитого океана зарегистрирован нижний предел температуры мерзлоты –12...–14 °С [Геология..., 2004]. В то же время есть данные о наличии участков побережья с не характерными для криолитозоны электрическими свойствами (криопэгги) [Брушков, 1998; Сухорукова, 2015]. В связи с возрастающим интересом к освоению побережья и шельфа Северного Ледовитого океана представляется актуальным изучение мерзлотного геоэлект-

рического разреза арктического побережья радиоволновыми методами.

Цель работ – получить новые данные об электрических свойствах и температурном режиме мерзлых почв и горных пород побережья моря Лаптевых в окрестностях пос. Тикси методами радиоимпедансного и георадарного зондирования.

Радиоволновые (электромагнитные) методы геофизики широко применяются при решении геокриологических задач, таких как определение геоэлектрического разреза (ГЭР) толщи много-

летнемерзлых пород, картирование островной мерзлоты, выделение таликовых зон и ряда других задач [Мельников, 1977; Башкуев, 1996; Мельников и др., 2006; Зыков, 2007; Ефремов, 2013; Макаров, Модин, 2013; Агеев и др., 2017; Arcone, Delaney, 1988; Tezkan, Saraev, 2008]. Однако в пределах побережья Северного Ледовитого океана целенаправленных исследований ГЭР радиоволновыми методами почти не проводилось [Башкуев и др., 2006]. Большой объем многочастотных радиоволновых измерений в скважинах был выполнен при пространственном геоэлектрическом мониторинге состояния многолетнемерзлых пород вблизи нагнетательных скважин на нефтяных месторождениях Западной Сибири [Черепанов, 2017, 2018]. Отличительная особенность этих работ состоит в том, что была детально изучена частотная дисперсия электрических свойств мерзлых грунтов в частотном диапазоне 1–50 МГц в условиях естественного залегания, а также рассмотрен эффект Максвелла–Вагнера [Губатенко, 1991]. Следует отметить, что частотная дисперсия электрических свойств мерзлых грунтов на образцах горных пород исследована в фундаментальной работе А.Д. Фролова [2005]. Радиоволновые зондирования в сверхнизкочастотном диапазоне электромагнитных волн (30–300 Гц) выполнялись преимущественно с целью изучения глубинного строения региона в связи с его высокой насыщенностью углеводородами [Жамалетдинов, 2015]. При этом приповерхностный ГЭР рассматривался как “обычный” элемент верхней части геологического разреза без учета его электрических свойств, строения и связи с геоморфологией.

Летом 2015 г. полевым отрядом Института физического материаловедения (ИФМ) СО РАН были проведены комплексные радиоэлектромагнитные зондирования для оценки современных геокриологических условий побережья моря Лаптевых в районе бухты Тикси.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район работ расположен в зоне сочленения глобальных структур Восточно-Сибирской платформы и Лаптевоморской тектонической плиты [Геология..., 2004]. Вдоль побережья моря Лаптевых простирается Северо-Сибирская низменность, поверхность которой сложена четвертичными озерно-аллювиальными, морскими и ледниковыми отложениями, песчаниками и глинистыми сланцами. В осадочных толщах содержатся каменный и бурый уголь, нефть и газ. Рельеф Северо-Сибирской низменности сформирован четвертичными оледенениями и морскими трансгрессиями, в целом он холмисто-грядовый и холмисто-ува-

листый с обширными аллювиальными депрессиями и плоскими аккумулятивными равнинами. Вся низменность пересечена субширотной системой моренных гряд с абсолютными высотами 150–250 м. В северной части низменность представляет собой лишайниковую и кустарниковую тундру.

Многолетнемерзлые породы характеризуются мощностью мерзлой толщи от 50 м в районе Оленекской протоки до 650 м в районе пос. Тикси [Геология..., 2004]. С приближением к береговой линии моря мощность этих пород существенно уменьшается. Под крупными озерами и протоками формируются как замкнутые, так и сквозные талики. Ледовый комплекс (сложно стратифицированная толща позднего плейстоцена) придает специфику разрезам надпойменной террасы. Мощность толщи этих льдистых супесей и суглинков достигает нескольких десятков метров. Строение их осложняется линзами разнозернистых песков и торфянистого материала. Местами имеются отдельные включения гравия и гальки. Нижняя часть мощных ледяных жил проникает в подстилающие отложения на глубину до 10 м. Подстилают ледовый комплекс песчаные слоистые и часто мощные (до 7 м) торфянистые горизонты. Ледовый комплекс иногда перекрывается линзами современных озерных, болотных и золовых осадков и пойменными отложениями [Геология..., 2004]. Параметры сезонного протаивания на надпойменной террасе существенно изменяются в зависимости от степени увлажненности, характера растительного покрова и геоморфологического положения грунта. В пределах заболоченных и торфянистых участков наблюдаемые в начале сентября толщины сезонного слоя (СТС) составляют 0.2–0.4 м. В зоне дренированной и незадернованной поверхности СТС имеет толщину 0.5–0.7 м. Местами на склонах террас толщина песчаного СТС достигает 1 м. В среднем же глубина сезонного оттаивания грунтов варьирует здесь от 0.4 до 0.6 м [Геология..., 2004].

Почвогрунты Северной Якутии характеризуются мерзлотным типом температурного режима. В работе [Федоров-Давыдов и др., 2015] исследован температурный режим почв (тундрового криозема) на п-ове Быковский, расположенном в районе бухты Тикси. Средняя температура почвы самого теплого месяца в арктической тундре равна 1.5 °С. При средней продолжительности безморозного периода 61 сут годовая сумма положительных среднесуточных температур равна 75 °С. Количество поступающей тепловой энергии (теплообеспеченность) для тундровых суглинистых криоземов составляет 1300–2400 ккал/м² в год. Максимальная глубина протаивания тундрового криозема на берегу Северного Ледовитого океана за 2001–2015 гг. находится в пределах 25–43 см.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения проведены комплексом радиоволновых методов радиоимпедансного и георадарного зондирования. По результатам сверхдлинно-волнового–длинноволнового–средневолнового (СДВ–ДВ–СВ) радиоимпедансного зондирования определены поверхностный импеданс и геоэлектрический разрез криолитозоны в 43 пунктах зондирования. В районе исследований пройдено два георадарных профиля общей протяженностью 2.11 км.

Цель экспериментов заключалась в определении поверхностного импеданса и геоэлектрического строения криолитозоны на радиочастотах СДВ–СВ диапазонов. Эти данные необходимы для оценки точности расчетов распространения земной волны в высоких широтах по локальным электрическим характеристикам криогенной подстилающей среды.

Электромагнитная (радиофизическая) задача получения количественных данных об электрических свойствах и геоэлектрическом разрезе побережья моря Лаптевых в районе бухты Тикси решалась на основе анализа амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля в точке наблюдения по данным метода радиоимпедансного зондирования в СДВ–ДВ–СВ диапазонах радиоволн [Башкуев, 1996]. Метод основан на изучении амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля на границе раздела “воздух–подстилающая среда”. Он позволяет производить непосредственные измерения модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ поверхностного импеданса с использованием полей радиостанций. Физической основой метода является скин-эффект. По измеренным тангенциальным составляющим электрического E_τ и магнитного H_τ полей определяется приведенный поверхностный импеданс подстилающей среды

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

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ – характеристический импеданс свободного пространства; μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); ε_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($8.854 \cdot 10^{-9}$ Ф/м).

Для измерений использованы электромагнитные поля СДВ–ДВ–СВ радиостанций 25, 320 и 660 кГц. Импедансметр представляет собой селективный микровольтметр-фазометр, измеряющий частотную зависимость модуля и фазы поверхностного импеданса, по которым при решении обратной задачи для модели слоистой среды находят параметры ГЭР: проводимость (σ_i), диэлектрическая проницаемость (ε_i) и мощность (h_i) каждого i -го слоя [Башкуев, 1996]. При измерениях использовался портативный импедансметр ИПИ-1000, обеспечивающий определение модуля

импеданса с погрешностью $\pm 5\%$, фазы импеданса с погрешностью $\pm(1-2)^\circ$ [Башкуев, 1996]. Для измерений тангенциальной составляющей электрического поля E_τ применялась симметричная незаземленная приемная линия длиной 20 м, позволяющая работать как на высокопроводящих, так и на плохо проводящих ГЭР. Датчиком тангенциальной составляющей магнитного поля H_τ служила рамочная антенна с блоком симметрирования.

Для решения обратной задачи радиоимпедансного зондирования для слоистой полупроводящей среды, удовлетворяющей импедансным граничным условиям, использован пакет программ “Импеданс” [Пакет..., 2002]. Критерием выбора “наилучшего” геоэлектрического разреза служил минимум среднеквадратического отклонения экспериментальных значений импеданса от рассчитанных для модели n -слойной среды. При решении обратной задачи частотная дисперсия электрических свойств мерзлых грунтов в диапазоне 25–620 кГц не учитывалась. Диэлектрическая проницаемость ε_i для трехслойной модели принята: для первого слоя $\varepsilon_1 = 10$, для второго слоя $\varepsilon_2 = 7$, для третьего слоя $\varepsilon_3 = 10$ [Мельчинов и др., 2006; Ефремов, 2013]. На рабочих частотах 25, 320, 660 кГц токи смещения будут существенно меньше токов проводимости и их вклад будет не очень большим. Поэтому значения диэлектрической проницаемости слоев при интерпретации можно зафиксировать.

Для георадиолокации использовался радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) “Око-2” с антенным блоком АБ-400 с центральной частотой 400 МГц [Радиотехнический прибор..., 2006]. Глубина зондирования георадара “Око-2” с блоком АБ-400 составляет 5 м, разрешающая способность по глубине 0.15 м. При съемке георадар перемещался вдоль профиля длиной от 0.1 до 2 км. При перемещении георадара по профилю исследуемого участка на экран монитора выводится совокупность сигналов (радарограмма), по которой определяется слоистость среды, местонахождение, глубина залегания и протяженность объектов (как металлических, так и неметаллических) [GeoScan32, 2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА И ГЕОРАДАРНЫЕ РАЗРЕЗЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

На рис. 1 представлен план района исследований с нанесенными пунктами измерений поверхностного импеданса и георадарного зондирования. Измерения поверхностного импеданса проведены на частотах СДВ (25 кГц), ДВ (320 кГц) и СВ (660 кГц) диапазонов в 43 пунктах наблюдений (см. рис. 1). Пункты наблюдения (п.н.) располагались на побережье бухты Тикси вдоль автодорог

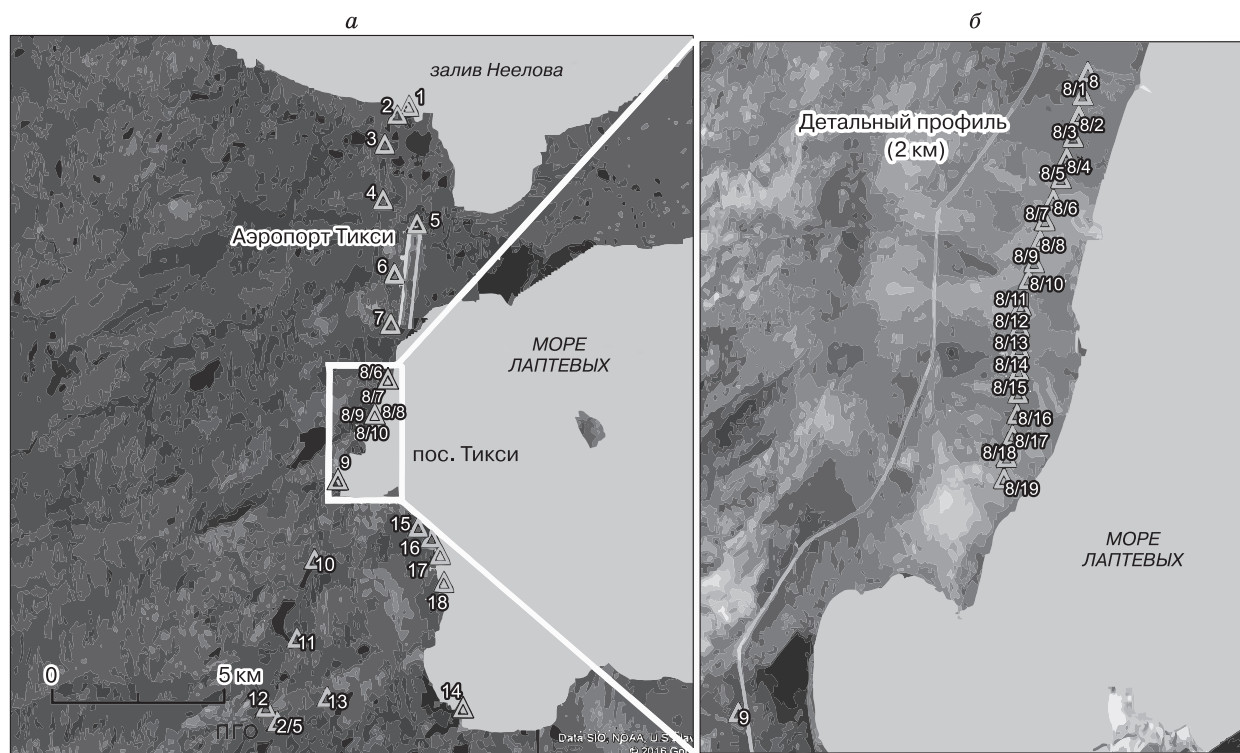


Рис. 1. Схема расположения пунктов измерения поверхностного импеданса на побережье моря Лаптевых в районе бухты Тикси.

а – схема с указанием всех пунктов измерений; *б* – схема детального двухкилометрового профиля.

Залив Неелова–аэропорт Тикси–пос. Тикси, пос. Тикси–ПГО ИКФИА СО РАН и вдоль берега к станции “Полярка” в заливе Сога. Радарограммы приведены на рис. 2, 3.

В целом модуль $|\delta|$ и фаза φ_δ импеданса изменяются в широких пределах, что свидетельствует о существенной дифференциации геоэлектрических условий в районе измерений. Вдоль побережья бухты Тикси в 200 м от берега исследован профиль протяженностью 2 км (20 пунктов измерений импеданса), сопровождаемый георадиолокационным зондированием георадаром “Око-2”.

Результаты измерений модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ импеданса на частотах 25, 320 и 660 кГц совместно с радарограммой представлены на рис. 2. Средние значения модуля и фазы импеданса на профиле составляют $|\delta| = 0.024$, $\varphi_\delta = -61^\circ$ на частоте 25 кГц, $|\delta| = 0.092$, $\varphi_\delta = -35^\circ$ на частоте 320 кГц, $|\delta| = 0.124$, $\varphi_\delta = -37^\circ$ на частоте 660 кГц. Радарограмма показывает насыщенный влагой талый слой толщиной 0.2–0.24 м с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 25$. Средняя часть профиля 0.3–1.7 км отличается меньшей электропроводностью. Об этом свидетельствует меньшее загухание сигнала георадара в талом слое и наличие выраженных кратных волн. Это может быть вызвано большей дрениро-

ванностью центральной части профиля из-за наличия уклона и водотоков. На 110-метровом георадарном профиле на территории Полярной геофизической обсерватории (ПГО) Института геофизических исследований и аэронауки (ИКФИА) СО РАН, расположенном в 5 км от побережья, талый слой почвы имеет толщину 45–50 см (см. рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При определении параметров геоэлектрических разрезов криолитозоны выделены мерзлые осадочные и кристаллические горные породы. Интерпретация радиоимпедансных зондирований состояла в решении обратной задачи на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова [Башкучев, 1996]. На рис. 4 для примера приведены результаты интерпретации частотных зависимостей импеданса криолитозоны в двух пунктах измерений на осадочных породах (п.н. 5, 3, см. рис. 4, *а*, *б*) и кристаллических породах (п.н. 13, 14, см. рис. 4, *в*, *г*). В табл. 1 представлены параметры геоэлектрических разрезов, соответствующие рис. 4.

Наиболее типичными для летней тундры являются ГЭР вида $\rho_1 < \rho_2$, $\rho_2 > \rho_3$ с сопротивлением верхнего слоя ρ_1 от 67 до 260 Ом·м и мощностью

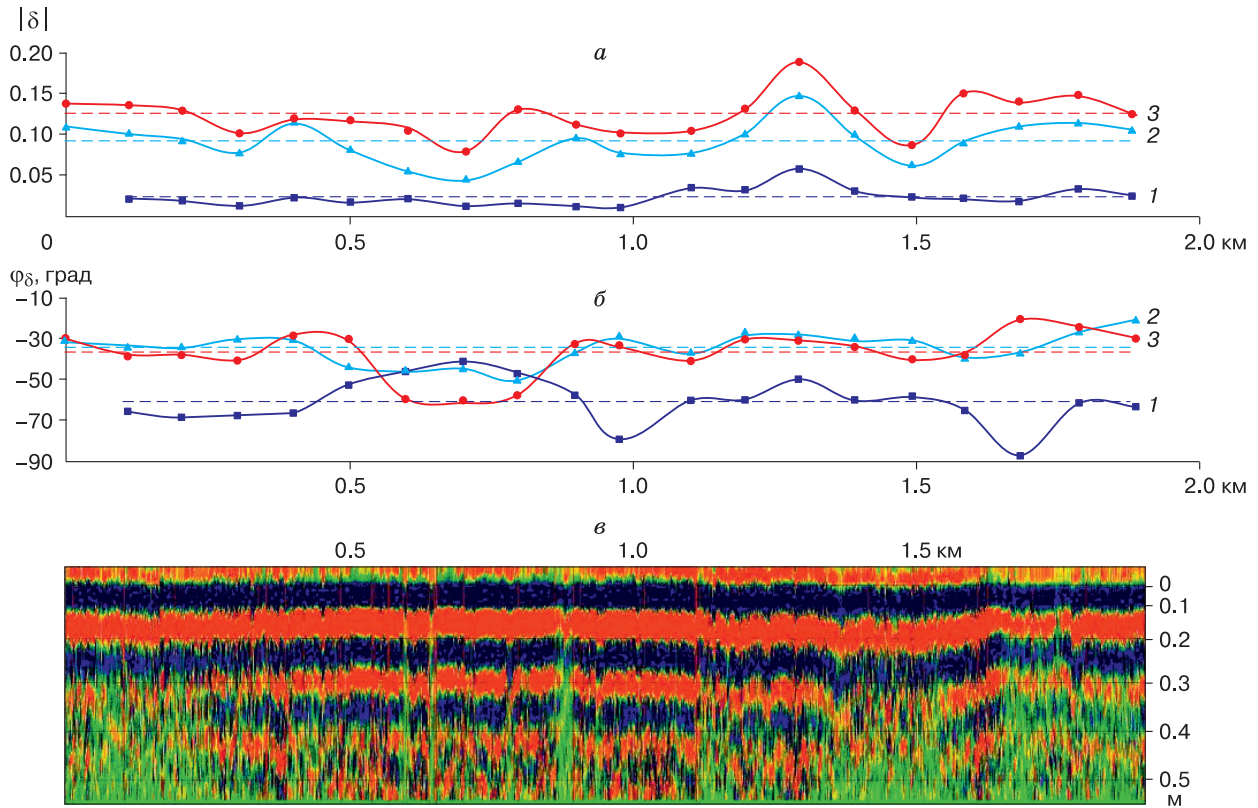


Рис. 2. Результаты измерений модуля $|\delta|$ (а) и фазы φ_δ (б) поверхностного импеданса на частотах 25, 320 и 660 кГц (линии 1–3 соответственно) и радарограмма (в) на двухкилометровом профиле вблизи побережья бухты Тикси.

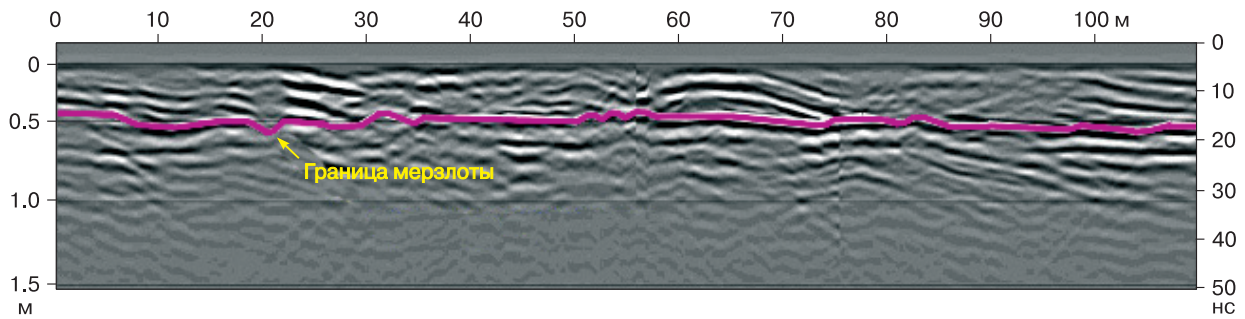


Рис. 3. Радарограмма 110-метрового профиля на территории Полярной геофизической обсерватории ИКФИА СО РАН.

Таблица 1. Плотность (ρ_i) и толщина слоев (h_i) для геоэлектрических разрезов по данным радиоимпедансных зондирований

Номер п.н.	ρ_i , Ом·м			h_i , м		
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3
5 (профиль от аэропорта)	67	1040	170	0.73	11	∞
3 (дальний привод)	260	5100	100	2.1	31	∞
13 (профиль от аэропорта)	1350	4860	580	24	84	∞
14 (профиль от аэропорта)	560	5300	100	17	32	∞

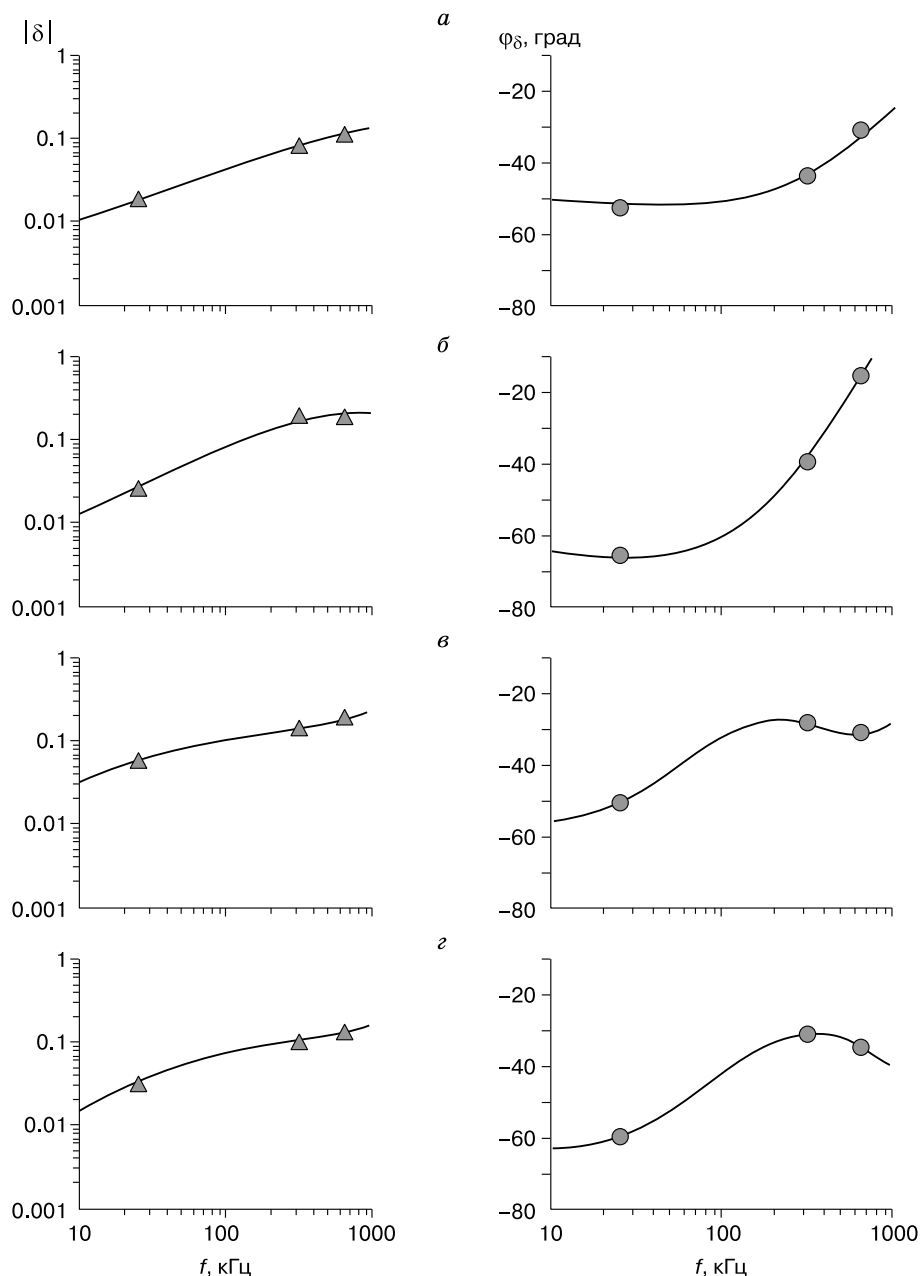


Рис. 4. Результаты интерпретации радиоимпедансных зондирований вблизи побережья Северного Ледовитого океана (район пос. Тикси).

Осадочные породы: а – п.н. 5, профиль от аэропорта, 10.07.2015 г.; б – п.н. 3, дальний привод, 07.07.2015 г.; кристаллические породы: в – п.н. 13, профиль от аэропорта, 10.07.2015 г.; г – п.н. 14, профиль от аэропорта, 10.07.2015 г.

от 0.7 до 2.1 м. Сопротивление ρ_2 мерзлого слоя мощностью от 11 до 84 м изменяется в пределах от 1040 до 5300 Ом·м. Подстилающий третий слой имеет сопротивление ρ_3 от 100 до 580 Ом·м. Кристаллические мерзлые породы (п.н. 13, 14) имеют летом в основном разрезы типа $\rho_1 < \rho_2, \rho_2 > \rho_3$ с сопротивлением слоев от 560 до 5300 Ом·м. Для монолитных скальных пород с низкой по-

ристостью и незначительной трещиноватостью характерны высокие сопротивления от 4800 до 5300 Ом·м с величиной отношения ρ_2/ρ_1 в пределах от 3.6 до 9.5.

На отдельных участках горных пород криолитозоны появляются условия для возникновения высокой концентрации солей в подземных водах. Эти участки называются криопэгами [Брушков,

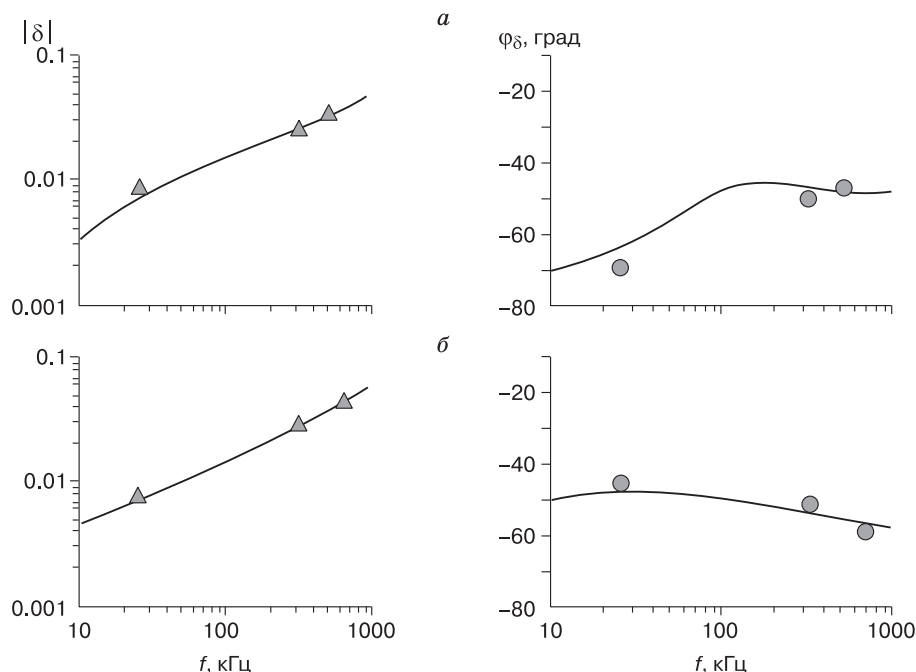


Рис. 5. Результаты интерпретации радиоимпедансных зондирований на участке развития криопэггов:
 а – п.н. 2/5; б – п.н. 12 на территории ПГО ИКФИА СО РАН.

1998; Сухорукова, 2015]. Грунтовые воды криопэггов находятся в жидком состоянии при достаточно низких отрицательных температурах. Авторами исследована хорошо проводящая мерзлотная структура, которая относится к типу “криопэггов”. Она имеет достаточно широкое площадное распространение в криолитозоне. Радиоимпедансное зондирование криопэггов в СДВ–СВ диапазонах дает очень низкие поверхностные импедансы по модулю $|\delta|$ и сильноиндуктивные фазы $\varphi_\delta < -60^\circ$. Минимальные значения модуля импеданса $|\delta|_{\min} = 0.004\text{--}0.027$ получены на “криопэггах” в районе расположения ПГО ИКФИА СО РАН. Например, пункт наблюдения № 1 на ПГО имел следующий ГЭР: сопротивление первого слоя $\rho_1 = 52 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, толщина первого слоя $h_1 = 1.1 \text{ м}$; второго – $\rho_2 = 9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_2 = 12 \text{ м}$; третьего – $\rho_3 = 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На рис. 5 приведены примеры геоэлектрических разрезов в районе базы ПГО ИКФИА СО РАН (п.н. 2/5, 12). В табл. 2 представлены параметры

геоэлектрических разрезов, соответствующие рис. 5.

Для радиофизики важное значение имеют не только параметры ГЭР, но и статистические характеристики модуля и фазы импеданса. Фаза импеданса на всех пунктах измерений принадлежит к индуктивной области и изменяется в пределах $-87\text{...}-7^\circ$. С ростом частоты модуль импеданса увеличивается, а его фаза смещается в слабоиндуктивную область. Так, на частоте 25 кГц сильноиндуктивные значения $\varphi_\delta < -45^\circ$ встречаются в 90 % случаев, а на частоте 660 кГц – только в 25 % случаев. Для тундровой зоны в районе залива Неелова характерны высокие значения модуля импеданса и сильноиндуктивные фазы импеданса. Для гористой местности фаза импеданса принимает слабоиндуктивные значения, а модуль импеданса соизмерим с импедансом тундры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения комплексных радиоволновых измерений и обобщения экспериментальных данных определен геоэлектрический разрез массивов горных пород и особенности пространственного распределения электрических свойств различных типов многолетнемерзлых почв и горных пород побережья моря Лаптевых в районе бухты Тикси. В исследованном районе геоэлектрические разрезы массивов горных пород отличаются большим разнообразием из-за присут-

Таблица 2. Плотность (ρ_i) и толщина слоев (h_i) для геоэлектрических разрезов по данным радиоимпедансных зондирований

Номер п.н.	$\rho_i, \text{ Ом} \cdot \text{м}$			$h_i, \text{ м}$		
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3
2/5	98	32	1.3	0.37	12	∞
12	515	30	8.6	1.0	29	∞

ствия в мерзлых рыхлых отложениях отдельных горизонтов разного сопротивления за счет изменения литологии, гранулометрического состава, появления повторно-жильных льдов и изменения минерализации подземных вод, за счет наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод. Выявлены участки развития криопэгов в массивах горных пород криолитозоны арктического побережья в районе бухты Тикси и установлены их электрические свойства.

Методика обследования массивов горных пород побережья моря Лаптевых по данным комплексирования радиоволновых измерений в СДВ–ДВ–СВ и УВЧ диапазонах и количественная интерпретация слоисто-неоднородной среды позволили получить обобщенные характеристики геоэлектрического строения мерзлотного разреза на глубину до 100 м. Сочетание радиолокационного принципа зондирования среды короткими радиоимпульсами [Владов, Старовойтов, 2004; Семейкин и др., 2005] со спектром в диапазоне 50–1700 МГц, реализованного в георадаре (глубинность 0.1–30 м), с методом радиоимпедансного зондирования непрерывными сигналами радиостанций в диапазоне 0.01–1.0 МГц (глубинность до 100–200 м) позволило получить подробную информацию о геоэлектрическом строении приповерхностной части земной коры. Технология бесконтактной радиоинтроскопии горного массива в СДВ–ДВ–СВ и ОВЧ–УВЧ диапазонах радиоволн повышает производительность малоглубинных зондирований в 3–5 раз по сравнению с методом вертикального электрического зондирования. Полученные результаты и разработанные методики радиоимпедансного и георадарного зондирования и профилирования подстилающей криогенной среды могут быть использованы при инженерно-геологических изысканиях в северных районах России.

Результаты исследования электрических свойств криогенных сред в области низких и средних радиочастот в целом привели к созданию банка данных электрических свойств криолитозоны, учитывающих слоистую структуру земной толщи [Башкуев, 1996; Башкуев и др., 2006; Мельчинов и др., 2006; Ефремов, 2013]. Эти данные необходимы при освоении арктического побережья в районе порта Тикси – морских ворот Республики Саха (Якутия).

Статья подготовлена по госбюджетному проекту “Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах”.

Литература

Агеев В.В., Агеев Д.В. Изучение мерзлых разрезов Якутии с помощью методов зондирования становлением поля в ближней зоне и вертикального электрического зондирова-

ния методом вызванной поляризации // Инж. геология, 2017, № 2, с. 64–69.

Ageev, V.V., Ageev, D.V., 2017. TEM and IP vertical electric soundings of permafrost in Yakutia. *Inzhenernaya Geologiya*, No. 2, 64–69.

Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1996, 207 с.

Bashkuev, Yu.B., 1996. *Electrical Properties of Natural Layered Media*. Izd. SO RAN, Novosibirsk, 207 pp. (in Russian)

Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П., Дембелов М.Г. и др. Влияние электрических свойств криолитозоны на распространение земной волны в высоких широтах // Геомagnetизм и аэрoномия, 2006, т. 46, № 4, с. 507–516.

Bashkuev, Yu.B., Melchinov, V.P., Dembelov, M.G., Angarkhaeva, L.Kh., Buyanova, D.G., Borsoev, V.A., 2006. Effect of permafrost electrical properties on the propagation of groundwaves in high latitudes. *Geomagnetizm i Aeronomiya* 46 (4), 507–516.

Брушков А.В. Засоленные многолетнемерзлые породы арктического побережья. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, 337 с.

Brouchkov, A.V., 1998. *Saline Permafrost of the Arctic Coast*. Moscow University Press, Moscow, 337 pp. (in Russian)

Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.

Vladov, M.L., Starovoitov, A.V., 2004. *Introduction into GPR Surveys*. Moscow University Press, Moscow, 153 pp. (in Russian)

Геология и полезные ископаемые России: В 6 т. Т. 5. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. Арктические моря / Отв. ред. И.С. Грамберг, В.Л. Иванов, В.П. Орлов, Ю.Е. Погребницкий. СПб., ВСЕГЕИ, 2004, 468 с.

Gramberg, I.S., Ivanov, V.L., Orlov, V.P., Pogrebitskiy, Yu.E. (Eds.), 2004. *Geology and Mineral Resources of Russia, in Six Volumes. Volume 5: Arctic and Far East Seas. Book 1. Arctic Seas*. VSEGEI, St. Petersburg, 468 pp. (in Russian)

Губатенко В.П. Эффект Максвелла–Вагнера в электроразведке // Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 1991, № 4, с. 88–98.

Gubatenko, V.P., 1991. The Maxwell–Wagner effect in resistivity surveys. *Izv. RAN, Ser. Fizika Zemli*, No. 4, 88–98.

Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2013, 204 с.

Efremov, V.N., 2013. *Radio-Frequency Impedance Soundings of Permafrost*. IMZ, Yakutsk, 204 pp. (in Russian)

Жамалетдинов А.А. Электропроводность земной коры в районе СНЧ-антенны “Зевс” по результатам зондирований на постоянном и переменном токе (Мурманский блок) // Материалы I Всерос. науч.-практ. семинара “Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ–СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой” (Апатиты, 17–22 февр. 2014 г.). Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 2015, т. 2, с. 63–71.

Zhamaletdinov, A.A., 2015. Crust resistivity in the area of the Zeus ELF antenna, from DC and AC measurements (Murmansk block), in: *Interactions of ELF Electromagnetic Fields with the Ionosphere and the Crust*, Proc. 1st All-Russian R&D Workshop (Apatity, 17–22 February, 2014), GI KNC RAN, Apatity, Book 2, pp. 63–71. (in Russian)

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.

Zykov, Yu.D., 2007. *Geophysical Surveys in Permafrost*. Moscow University Press, Moscow, 272 pp. (in Russian)

Макаров Д.В., Модин И.Н. Электрометрические исследования на насыпной плотине в зоне вечной мерзлоты: первый этап мониторинга // Инж. изыскания, 2013, № 10–11, с. 116–121.

Makarov, D.V., Modin, I.N., 2013. Electrical soundings of an earth-fill dam in permafrost: first stage of monitoring. *Inzhenernye Izyskaniya*, No. 10–11, 116–121.

Мельников В.П. Электрофизические исследования мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1977, 108 с.

Melnikov, V.P., 1977. Geoelectrical Surveys in Permafrost. Nauka, Novosibirsk, 108 pp. (in Russian)

Мельчинов В.П. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне / В.П. Мельчинов, Ю.Б. Башкуев, Л.Х. Ангархаева, Д.Г. Буянова. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2006, 257 с.

Melchinov, V.P., Bashkuev, Yu.B., Angarkhaeva, L.Kh., Buyanova, D.G., 2006. Electrical Properties of Permafrost in Eastern Russia. BSC, Ulan-Ude, 257 pp. (in Russian)

Пакет программ “Импеданс” для решения задач радиомпедансного зондирования / Ангархаева Л.Х. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2002610893. М., Роспатент; 06.06.2002.

Angarkhaeva, L.Kh., 2002. *Impedans* Software for Radio-Frequency Impedance Data Processing. Official Registration Certificate of a PC Program, No. 2002610893, 06.06.2002. Rospatent, Moscow.

Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) “Око-2”. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. М., ООО “Логические Системы”, 2006, 101 с.

Oko-2 Georadar, 2006. A Radio-Technical Apparatus for Shallow Soundings (Georadar). Engineering Manual. ООО Logicheskie Sistemy, Moscow, 101 pp. (in Russian)

Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Развитие георадаров серии “ОКО” // Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А.Ю. Гринева. М., Радиотехника, 2005, с. 231–236.

Semeikin, N.P., Pomozov, V.V., Dudnik, A.V., 2005. Advance of *Oko* Georadars, in: Grinev, A.Yu. (Ed.), Problems of Shallow Radar Surveys, Radiotekhnika, Moscow, pp. 231–236. (in Russian)

Сухорукова А.Ф. Состояние изученности криопеггов в Арктической зоне Сибири // Тр. XI Междунар. науч. конгресса “Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015” (Новосибирск, 13–25 апр. 2015 г.). Новосибирск, 2015, с. 172–176.

Sukhorukova, A.F., 2015. Cryopegs in the Arctic Zone: State of the Art, in: Interexpo GEO-Sibir-2015, Proc. XI Intern. Conf., Novosibirsk, 13–25 April 2015, Novosibirsk, pp. 172–176. (in Russian)

Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И. и др. Температурный режим почв северной Якутии // Материалы науч. конф. “Почвы холодных областей: генезис, гео-

графия, экология” (Улан-Удэ, 31 авг.–2 сент. 2015 г.). Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 2015, с. 110–111.

Foydorov-Davydov, D.G., Davydov, S.P., Davydova, A.I., Ostroumov, V.E., Kholodov, A.L., Sorokovikov, V.A., Shmelev, D.G., 2015. The temperature regime of soils in northern Yakutia, in: Soils of Winter Regions: Genesis, Geography, and Environment, Proc. Conf., 31 August–2 September 2015, Ulan-Ude, BSC, Ulan-Ude, pp. 110–111. (in Russian)

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. 2-е доп. и испр. изд. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 2005, 607 с.

Frolov, A.D., 2005. Electrical and Elastic Properties of Permafrost and Ice. 2nd Edition, Revised and Corrected, ONTI PSC, Pushchino, 607 pp. (in Russian)

Черепанов А.О. Многочастотные радиоволновые измерения в скважинах для контроля за процессом оттаивания ММП (на примере месторождения нефти “Русское”, Западная Сибирь) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 4 (вып. 36), с. 98–102.

Cherepanov, A.O., 2017. Multi-frequency radiowave propagation measurements in boreholes for monitoring of permafrost thawing: Case study of the Russkoye oilfield, West Siberia. Vestnik KRAUNC, Nauki o Zemle, No. 4 (issue 36), 98–102.

Черепанов А.О. Пространственный геоэлектрический мониторинг состояния многолетнемерзлых пород вблизи эксплуатационных скважин на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2018, 25 с.

Cherepanov, A.O., 2018. Spatial Geoelectrical Monitoring of Permafrost near Production Wells in West Siberia. Author's Abstract, Candidate Thesis (Engineering). Moscow, 25 pp. (in Russian)

Arcone, S.A., Delaney, A.J. Borehole investigation of the electrical properties of frozen silt // Proc. of 5th Intern. Conf. on Permafrost. Trondheim, Norway, Tapir Publ., 1988, p. 910–915.

GeoScan32. Иллюстрированное руководство пользователя. Раменское, Моск. регион, ЛОГИС, 2013, 132 с.

GeoScan32, 2013. Illustrated User's Manual. LOGIS, Ramenskoe, Moscow Region, 132 pp. (in Russian)

Tezkan, B., Saraev, A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations // Near Surface Geophys., 2008, vol. 6, No. 4, p. 245–252.

*Поступила в редакцию 21 октября 2017 г.,
после доработки – 29 октября 2018 г.,
принята к публикации 16 ноября 2018 г.*