

УДК 538.566

## РАДИОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В РАЙОНЕ АРКТИЧЕСКОГО ПОСЕЛКА ТИКСИ

Ю. Б. Башкуев<sup>1</sup>, М. Г. Дембелов<sup>1</sup>, В. Б. Хаптанов<sup>1</sup>, В. П. Мельчинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения СО РАН,  
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д.6

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, д.58

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2018 г.

**Аннотация.** Рассмотрены экспериментальные результаты измерений уровней сигналов и поверхностного импеданса на радиотрассах протяженностью до 20 км в прибрежной арктической зоне вблизи п. Тикси. В каждом пункте выполнены измерения уровня поля и поверхностного импеданса с использованием сигналов радиостанций, работающих на частотах 25, 320 и 660 кГц. Сравнение измеренных и рассчитанных значений уровня поля земной волны и модуля функции ослабления над мерзлотными трассами выполнено на частотах приводных радиостанций аэропорта п. Тикси 320 и 660 кГц. Функция ослабления поля земной волны рассчитывалась по методу интегрального уравнения для многокусочных импедансных трасс. Результаты оценки влияния электрических неоднородностей на распространение радиоволн показали хорошую сходимость с расчетами.

**Ключевые слова:** поле земной волны, функция ослабления, поверхностный импеданс, электропроводность воды.

**Abstract:** Experimental results of measurements of surface impedance and reception of signal levels on radio paths up to 20 km in length in the coastal Arctic zone near the Tiksi are considered. At each point of determining the field level, surface impedance measurements were made using signals from radio stations operating at frequencies of 25, 320 and 660 kHz. The comparison of the measured and calculated values of the ground-field level and the attenuation function module over the permafrost paths was performed at frequencies of radio stations of the Tiksi airport

(320 and 660 kHz). The ground wave field attenuation function was calculated using the integral equation method for multi-sectional impedance paths. The results of the evaluation of the effect of electrical inhomogeneities on the propagation of radio waves showed good agreements with the calculations.

**Key words:** Earth's wave field, an attenuation function, surface impedance, water conductivity.

## 1. Введение

Работа посвящена анализу результатов радиоволновых измерений в высоких широтах, выполненных в июле 2015 года в районе поселка Тикси в СДВ-ДВ-СВ диапазонах радиоволн. Измерения проведены комплексом радиофизических методов: 1) радиокомпарирования поля ДВ-СВ радиомаяков, 2) радиоимпедансного и георадарного зондирования, 3) электрметрии морской пресной воды. По результатам СДВ-ДВ-СВ радиоимпедансного зондирования определены поверхностный импеданс и геоэлектрический разрез криолитозоны в 19 пунктах зондирования. Проведено сравнение модуля функции ослабления поля земной волны ДВ-СВ радиомаяков на двух высокоширотных многокусочных импедансных радиотрассах с расчетными данными. Для сравнения использованы численные результаты, полученные по разработанным авторами методам расчетов поля земной волны над неоднородными импедансными трассами [1-7].

На рис. 1 представлена схема района исследований с нанесенными пунктами измерений поверхностного импеданса и полей радиостанций 25 кГц, дальнего и ближнего приводных радиомаяков 320 и 660 кГц. Отмечены трассы распространения радиоволн от дальнего и ближнего излучателей до пункта Полярная геокосмофизическая обсерватория (ПГО) ИКФИА СО РАН и пункта Полярка (станция Росгидромет) соответственно.

Цель экспериментальных работ заключалась в определении геоэлектрического строения криолитозоны на радиочастотах СДВ-СВ диапазонов и оценке точности расчетов распространения земной волны в

высоких широтах по локальным электрическим характеристикам криогенной подстилающей среды.

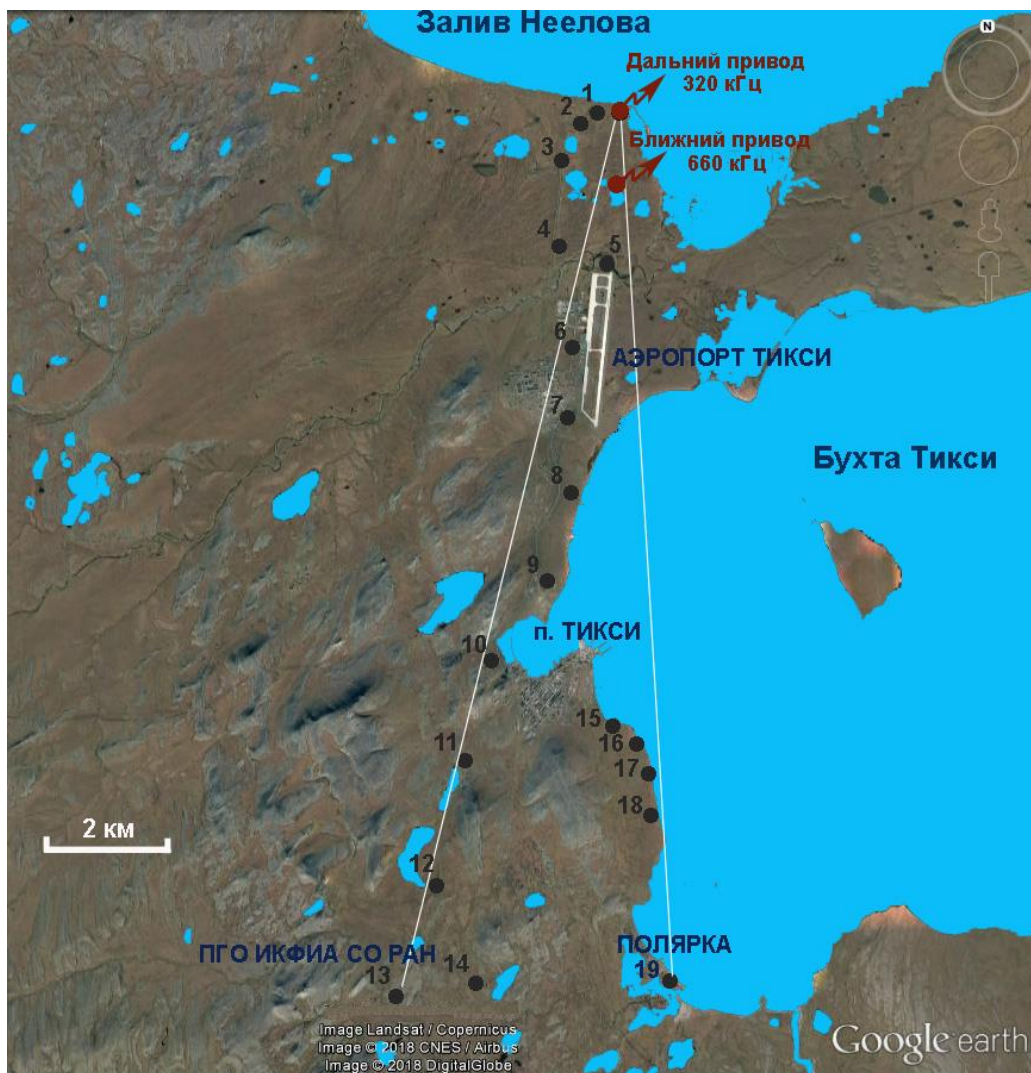


Рис. 1. Схема расположения пунктов измерения поверхностного импеданса и полей радиостанций 320 кГц и 660 кГц на трассах «Дальний (Ближний) привод – ПГО ИКФИА СО РАН» и «Дальний (Ближний) привод - Полярка».

Основой для расчетов электромагнитного поля являлись результаты измерений поверхностного импеданса и топографические карты, характеризующие рельеф и площадное распределение водного и ледового покровов. При расчетах распространения ДВ-СВ радиоволн вдоль земной поверхности использован приведенный поверхностный импеданс  $\delta$  подстилающей среды, определяемый как отношение тангенциальных составляющих электрического  $E_\tau$  и магнитного  $H_\tau$  полей на границе раздела

«воздух-земля»:  $\delta = \frac{E_{\tau}}{H_{\tau} Z_0}$ , где  $Z_0 = 120\pi$  - импеданс свободного пространства.

Модель подстилающей среды в локальной точке рассматривается как горизонтально-слоистая среда с электрическими параметрами  $\rho_i$ ,  $\epsilon_i$  в каждом слое толщиной  $h_i$ . Значения модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_{\delta}$  импеданса получены прямыми измерениями методом радиоимпедансного зондирования (РИЗ). Расчеты функции ослабления  $W$  проведены для модели многокусочной импедансной радиотрассы, в которой импеданс изменяется вдоль направления распространения радиоволн [8, 9].

## 2. Поверхностный импеданс и геоэлектрический разрез многолетней мерзлоты

Измерения поверхностного импеданса проведены методом РИЗ на частотах СДВ (25 кГц), ДВ (320 кГц) и СВ (660 кГц) диапазонов всего в 37 пунктах наблюдений. При измерениях использовался импедансметр ИПИ-1000, обеспечивающий определение модуля импеданса с погрешностью  $\pm 5\%$ , фазы импеданса  $\pm(2-3)^\circ$ . Весь район исследований относится к зоне многолетней мерзлоты. В целом модуль  $|\delta|$  и фаза  $\varphi_{\delta}$  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 детальный профиль протяженностью 2 км из 20 пунктов измерений импеданса, сопровождаемый георадиолокационным зондированием. Для георадиолокации использовался радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-2» с антенным блоком АБ 400 с центральной частотой 400 МГц. Результаты измерений модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_{\delta}$  импеданса на частотах 25, 320 и 660 кГц совместно с радарограммой на профиле у побережья бухты Тикси (между п.н. 8 и 9 на рис. 1) 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 профиля показывает

толщину насыщенного влагой талого слоя 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 затухание сигнала георадара в талом слое и наличие выраженных кратных волн. Это может быть вызвано большей дренированностью центральной части профиля из-за наличия уклона и водотоков.

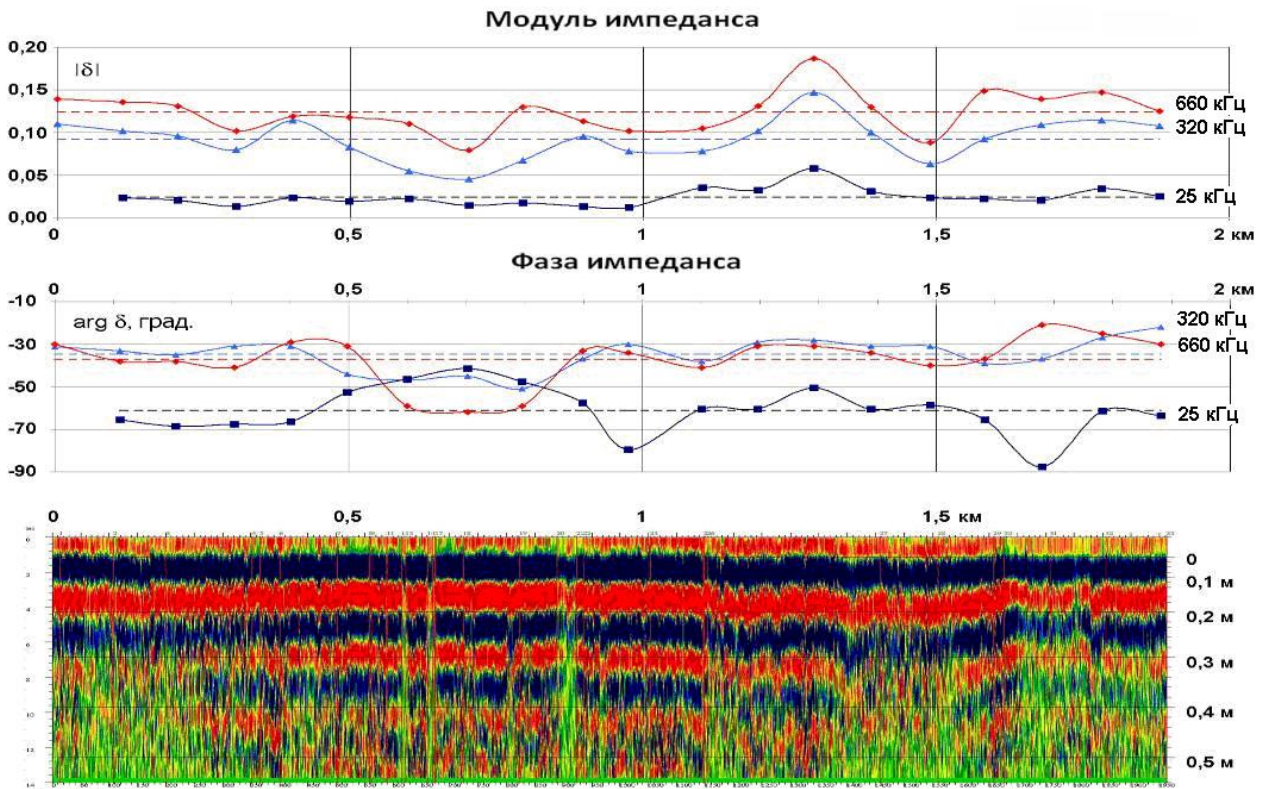


Рис. 2. Результаты измерений модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_\delta$  поверхностного импеданса на частотах 25, 320 и 660 кГц совместно с радарограммой на двухкилометровом профиле побережья бухты Тикси (между п.н. 8 и 9 на рис. 1).

Рассмотрим результаты определения 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 [4]. На рис. 3 для примера приведены результаты интерпретации частотных зависимостей поверхностного импеданса криолитозоны в пунктах измерений на осадочных породах (п.н. 5 и 3, рис. 3 а,б) и кристаллических породах (п.н. 13 и 14, рис. 3 в,г). Наиболее типичными для летней тундры являются геоэлектрические разрезы (ГЭР) типа  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$  с сопротивлением осадочного

верхнего слоя  $\rho_1$  от 67 до 260 Ом·м и толщиной около 0,7 м. Сопротивление мерзлого слоя толщиной от 11 до 84 м изменяется в пределах от 1040 до 5300 Ом·м. Для тундровой зоны в районе залива Неелова характерны высокие значения модуля импеданса и сильно-индуктивные значения фазы импеданса. Для гористой местности фаза импеданса принимает слабо-индуктивные значения, а модуль импеданса соизмерим с импедансом тундры. Фаза импеданса на всех пунктах измерений относится к индуктивной области и изменяется в пределах  $(-87^0 \div -7^0)$ . С ростом частоты модуль импеданса увеличивается, а его фаза смещается в слабо-индуктивную область. Так, на частоте 25 кГц сильно-индуктивные значения  $\varphi_\delta < -45^0$  встречаются в 90% случаев, а на частоте 660 кГц – только в 25 % случаев. Кристаллические мерзлые породы (п.н. 13) имеют летом, в основном, разрезы типа  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$  с сопротивлением слоев от 560 до 5300 Ом·м. Для монолитных скальных пород с низкой пористостью и незначительной трещиноватостью характерны высокие сопротивления от 4800 до 5300 Ом·м и величиной отношения  $\rho_2/\rho_1$  в пределах от 3,6 до 9,5.

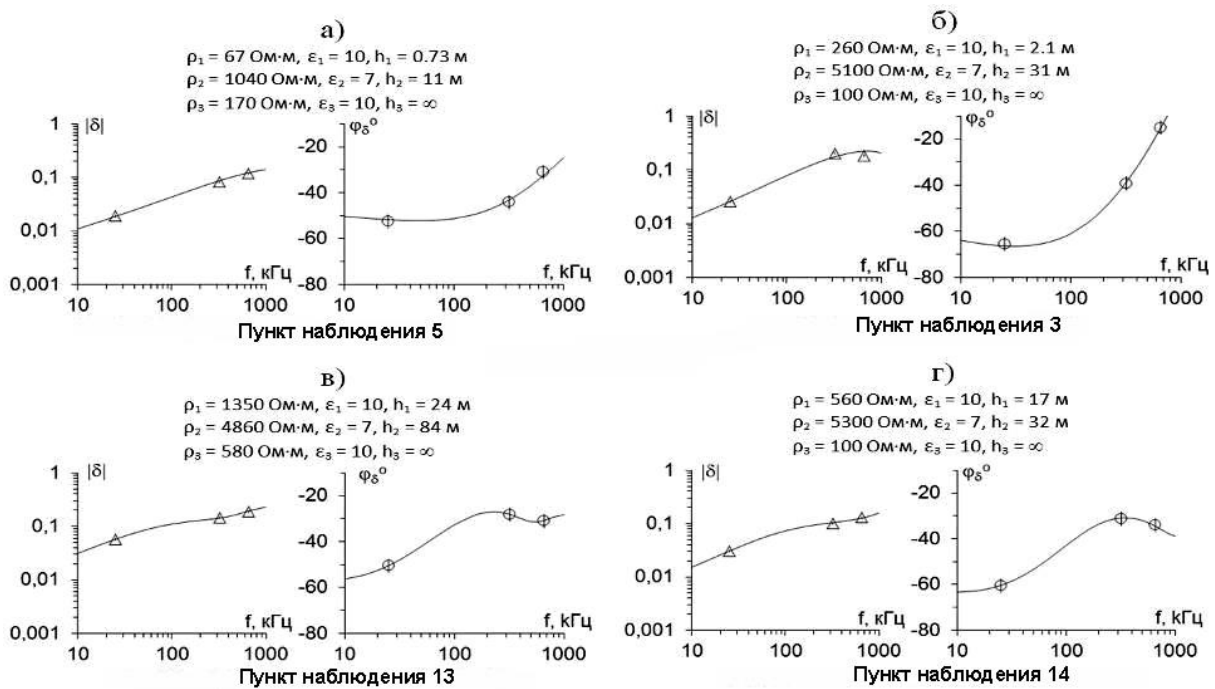


Рис. 3. Результаты интерпретации радиоимпедансных зондирований вблизи побережья Северного Ледовитого океана (район п. Тикси): а, б) – осадочные породы; в, г) – кристаллические породы.



### 3. Электропроводность водной среды в высоких широтах

Для измерений удельного электрического сопротивления (УЭС) проб воды использован цифровой мультиметр АМ-3003 фирмы Актаком с датчиком УК-0,2/1 от кондуктометра ММЗЧ-0,4. Погрешность определения УЭС, ( $\rho$  в Ом·м) не превышала  $1 \div 2\%$ . Исследовались УЭС проб воды из акватории залива Неелова (дельта реки Лена) и бухты Тикси. Температурные зависимости УЭС представлены на рис. 4. Бухта Тикси имеет УЭС воды значительно выше, чем для морской воды. Это может быть объяснено распресняющим действием воды из дельты реки Лена. Так, пресная вода залива Неелова имеет при температуре  $5^{\circ}\text{C}$  высокое УЭС, достигающее 130 Ом·м. Две пробы воды, взятые в разных местах бухты Тикси, дали близкие значения УЭС. Вода из растопленного льда бухты Тикси имеет очень низкое УЭС, близкое к УЭС морской воды. Данные по электропроводности необходимы для расчетов поверхностного импеданса акваторий северных морей.

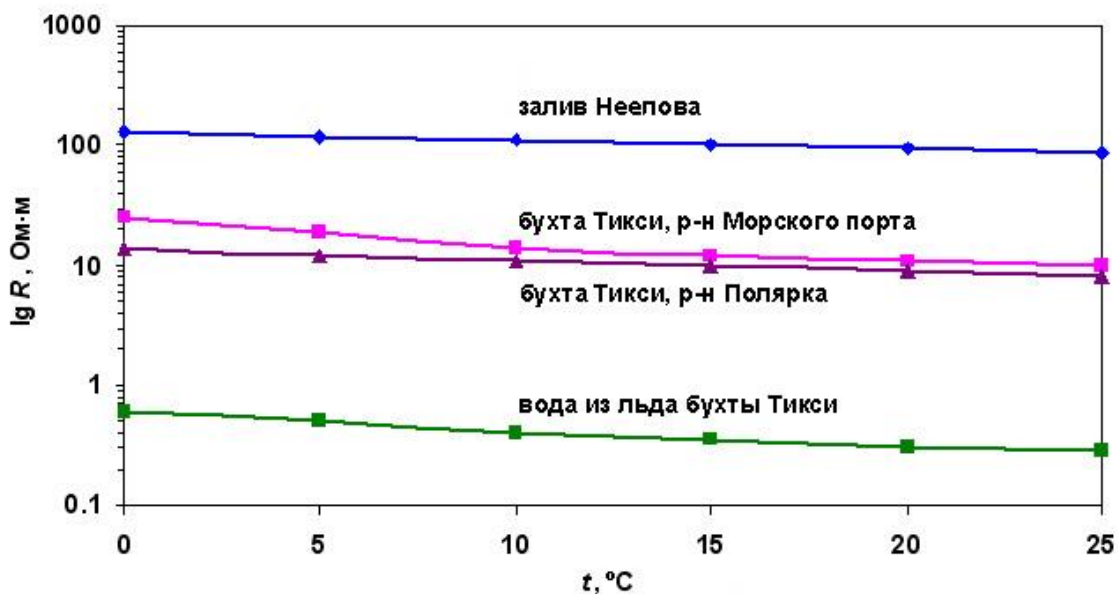


Рис. 4. Температурные зависимости УЭС проб воды в районе п. Тикси.

### 4. Результаты измерений полей ДВ-СВ диапазонов

На побережье Северного Ледовитого океана в районе п. Тикси ( $71.584^{\circ}$  с.ш.,  $128.768^{\circ}$  в.д.) проведены эксперименты по определению ослабления поля земной волны методом радиокомпарирования. Измерения уровня сигнала на

входе приемника от вертикальной излучающей антенны радиомаяков ПАР-10 выполнены на различных расстояниях от приводных радиостанций аэропорта Тикси с использованием сканирующего приемника WR-G31DDC "EXCALIBUR" с рамочной антенной в виде цилиндра (диаметр  $D=93$  мм, длина  $L=132$  мм, 108 витков медного эмалированного провода  $d=1,25$  мм), настроенной в резонанс на частоты 320 кГц и 660 кГц. Радиостанции ПАР-10 излучали электромагнитное поле вертикальной поляризации, распространяющееся в дневное время земной волной. Ток в антенне дальней приводной радиостанции был равен 7 А, в антенне ближней приводной радиостанции – 8 А. Погрешность определения модуля функции ослабления  $|W|$  не превышала  $\pm 5\%$ . Радиокмпарирование выполнено в двух направлениях по трассам от двух приводных радиостанций до ПГО (трассы I и II) и пункта Полярка (трассы III и IV) вдоль земной поверхности в 18 пунктах вдоль имеющихся дорог (см. рис. 1). Часть измерений выполнена в пешеходном варианте по побережью бухты Тикси в удалении от имеющихся дорог (п.н. 8, 14-17). Пункты радиокмпарирования можно разделить на две трассы: сухопутную (до ПГО ИКФИА) и морскую (до пункта Полярка), где значительная часть трассы распространения радиоволн проходит над заливом «Бухта Тикси».

Модуль функции ослабления  $|W|$  определялся путем нормировки измеренных значений  $U_j$  в точке  $R_j$  к величине произведения  $U_0R_0$  в «нулевой» точке, где  $|W|$  принята равной единице [2-4]:  $|W|_j = (U_j \cdot R_j) / (U_0 \cdot R_0)$ . Расстояние  $R_0$ , на котором определялось значение сигнала (поля)  $U_0$ , выбиралось исходя из условия  $1,5\lambda \leq R_0 \leq \lambda^2\sigma$ , где  $\sigma$  — проводимость грунта в районе расположения излучателя [4].

Местность, над которой проходили радиотрассы I и II, представляет собой холмистую поверхность с перепадом высот до 150 м. Высота холмов меньше длины волны для частоты 660 кГц ( $\lambda = 454$  метра), поэтому рельеф трассы не сильно оказывает влияния на процесс распространения радиоволн. Трассы III и IV на протяжении около 10 км проходят над бухтой Тикси. Акватория занимает



около 70% длины трассы. Участки суши в районе залива Неелова представляют собой заболоченную тундру. Измерения уровня поля выполнялись как от дальней, так и от ближней приводной радиостанции. Расчеты модуля функции ослабления  $|W|$  по четырем выбранным радиотрассам выполнены по методу интегрального уравнения Хаффорда [8]. На начальном участке трассы функция ослабления вычислялась по формуле А.Зоммерфельда с помощью рядов в предположении, что в окрестности излучателя справедлива модель однородной по импедансу плоской поверхности. Расчеты модуля функции ослабления проведены по измеренным поверхностным импедансам. Для трассы I на частоте 320 кГц определены следующие импедансные разбиения участков:

$$\begin{array}{lll}
 R = 0-3,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,205; & \varphi_{\delta} = - 39^{\circ}; \\
 R = 0-3,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,079; & \varphi_{\delta} = - 10^{\circ}; \\
 R = 8-13,6 \text{ км}; & |\delta| = 0,032; & \varphi_{\delta} = - 56^{\circ}; \\
 R = 13,6-16 \text{ км}; & |\delta| = 0,022; & \varphi_{\delta} = - 51^{\circ}; \\
 R = 16-18,2 \text{ км}; & |\delta| = 0,032; & \varphi_{\delta} = - 62^{\circ}; \\
 R = 18,2-20 \text{ км}; & |\delta| = 0,028; & \varphi_{\delta} = - 51^{\circ}.
 \end{array}$$

Для трассы II на частоте 660 кГц определены разбиения:

$$\begin{array}{lll}
 R = 0-2 \text{ км}; & |\delta| = 0,185; & \varphi_{\delta} = - 15^{\circ}; \\
 R = 2-7,4 \text{ км}; & |\delta| = 0,12; & \varphi_{\delta} = - 34^{\circ}; \\
 R = 7,4-11,2 \text{ км}; & |\delta| = 0,05; & \varphi_{\delta} = - 60^{\circ}; \\
 R = 11,2-13,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,034; & \varphi_{\delta} = - 58^{\circ}; \\
 R = 13,5-15,8 \text{ км}; & |\delta| = 0,054; & \varphi_{\delta} = - 68^{\circ}; \\
 R = 15,8-20 \text{ км}; & |\delta| = 0,044; & \varphi_{\delta} = - 60^{\circ}.
 \end{array}$$

Для трассы III на частоте 320 кГц определены разбиения:

$$\begin{array}{lll}
 R = 0-6 \text{ км}; & |\delta| = 0,205; & \varphi_{\delta} = - 39^{\circ}; \\
 R = 6-20 \text{ км}; & |\delta| = 0,015; & \varphi_{\delta} = - 44^{\circ}.
 \end{array}$$

Для трассы IV на частоте 660 кГц определены разбиения:

$$\begin{array}{lll}
 R = 0-4,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,182; & \varphi_{\delta} = - 15^{\circ}; \\
 R = 6-20 \text{ км}; & |\delta| = 0,02; & \varphi_{\delta} = - 44^{\circ}.
 \end{array}$$

Также трасса IV рассматривалась в виде 4-кусочной модели:

$$\begin{array}{lll}
 R = 0-4,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,182; & \varphi_{\delta} = - 15^{\circ}; \\
 R = 6-10,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,02; & \varphi_{\delta} = - 44^{\circ}. \\
 R = 10,5-13,5 \text{ км}; & |\delta| = 0,158; & \varphi_{\delta} = - 39^{\circ} \\
 R = 13,5-20 \text{ км}; & |\delta| = 0,02; & \varphi_{\delta} = - 44^{\circ}.
 \end{array}$$

Анализ полученных данных показывает наличие эффекта восстановления поля на всех трассах. На сухопутных трассах I и II этот эффект может быть обусловлен тем, что значительная концевая часть трасс обладает сильно-индуктивным импедансом (п.н. 9-12) (рис. 5). На «морских» трассах III и IV восстановление поля обусловлено переходом границы «суша-море» (рис. 6).

Графики  $|W|$  на рис. 5 показывают, что расчеты функции ослабления по измеренным импедансам дают хорошее согласие с результатами радиокомпарирования. Расхождения между расчетными  $|W|_p$  и экспериментальными  $|W|_э$  значениями в начальных пунктах обусловлены тем, что пункты измерения располагались в стороне от линии трассы распространения. Показано, что расчеты с учетом рельефа местности лучше согласуются с экспериментальными результатами. Для трассы «ближняя приводная радиостанция – Полярка» (Трасса IV) выполнены вариант расчета функции ослабления для 2-х кусочной модели и вариант с учетом участка суши (10,5 – 13, 5 км), т.е. 4-х кусочная модель. На рис. 6. для трассы IV можно наблюдать согласованность измеренных значений  $|W|$  с расчетами, учитывающими дополнительный участок суши.

Результаты радиокомпарирования на сухопутной и морской трассах в районе сплошного распространения мерзлоты на частотах 320 и 660 кГц показали, что в среднем расхождение между расчетными (по данным прямых измерений импеданса) и измеренными значениями  $|W|$  на трассах протяженностью до 18 км не превышает  $\pm (5-15)\%$ . Сопоставление измеренных и расчетных значений модуля функции ослабления  $|W|$  показало хорошее соответствие принятой модели многокусочной импедансной радиотрассы для расчета электромагнитных полей над неоднородной земной поверхностью. Следовательно, модель многокусочной импедансной трассы, учитывающая реальное распределение электрических свойств подстилающей среды, рельеф и ледовый покров, позволяет с высокой точностью проводить расчеты распространения земной волны в высоких широтах.

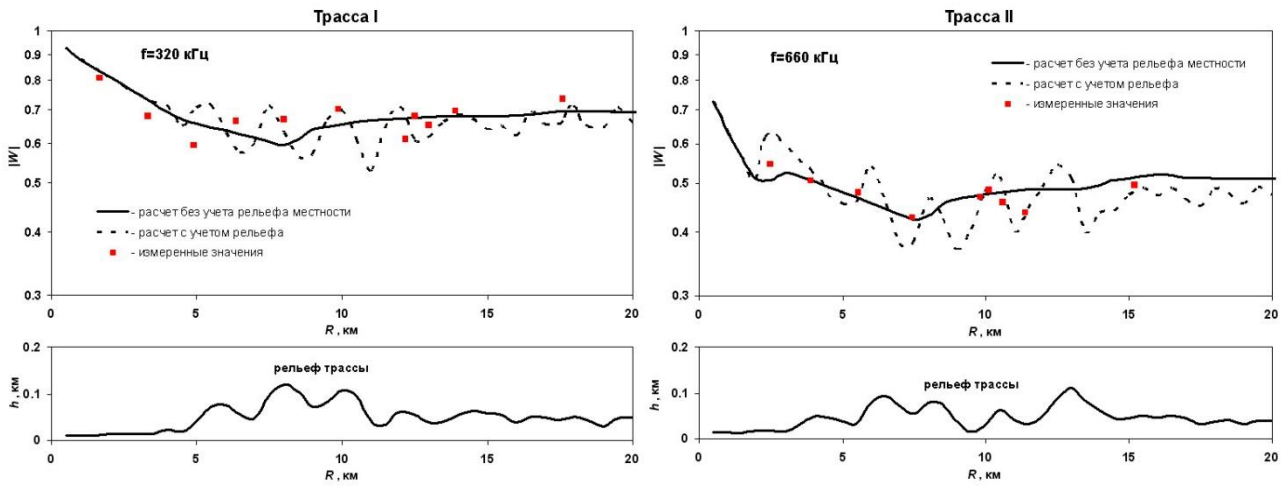


Рис. 5. Сравнение рассчитанных без учета рельефа (сплошная линия), с учетом рельефа местности (пунктирная линия) и измеренных (красные квадратики) значений модуля функции ослабления  $|W|$  на многокусочных импедансных трассах I и II.

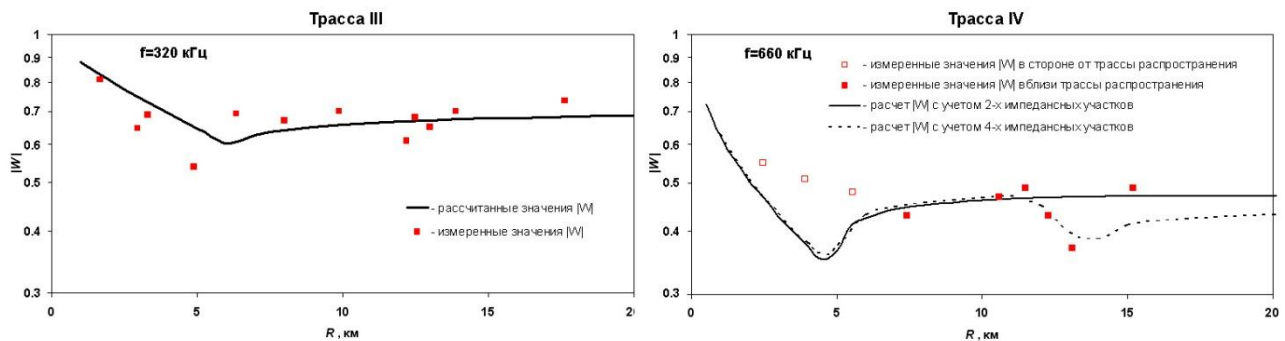


Рис. 6. Сравнение рассчитанных (сплошная линия) и измеренных (красные квадратики) значений модуля функции ослабления  $|W|$  на многокусочных импедансных трассах III и IV.

## 5. Заключение

В результате проведения комплексных радиофизических измерений и обобщения большого количества экспериментальных данных определен геоэлектрический разрез криолитозоны и особенности пространственного распределения электрических свойств различных типов многолетнемерзлых горных пород.

Показано, что при учете электрических параметров, рельефа, растительного и ледового покровов радиотрассы получена высокая точность расчетов амплитудно-фазовой структуры и уровня электромагнитного поля на

высокоширотных радиотрассах. Для повышения качества работы ДВ-СВ радиосистем в высоких широтах предложена методика расчетов электромагнитного поля, основанная на картах параметров геоэлектрических разрезов подстилающей среды, цифровых картах рельефа и ледового покровов, а также моделях сезонных изменений поверхностного импеданса [1-7].

Использование концепции поверхностного импеданса позволило в  $1,5\div 3$  раза увеличить точность расчетов электромагнитного поля по сравнению с существующей картой Моргана-Максвелла. Результаты измерений могут стать основой для оценки эффективности каналов связи в арктических районах. Определение отношения сигнал/шум на трассах «источник поля - среда распространения - приемник» может быть полезным для широкого использования в высокоточных арктических радиосистемах (например, ККС системы ГЛОНАСС). Ценность проведенных исследований состоит в большом объеме экспериментальных данных, полученных в результате наземных экспериментов в высоких широтах.

Исследование выполнено по госбюджетному проекту «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» и частично при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Республики Саха (Якутия) в рамках научного проекта № 18-41-140002-р\_а.

### **Литература**

1. Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П., Дембелов М.Г., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г., Борсоев В.А. Влияние электрических свойств криолитозоны на распространение земной волны в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 507-516.
2. Цыдыпов Ч.Ц., Цыденов В.Д., Башкуев Ю.В. Исследование электрических свойств подстилающей среды. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1979. 176 с.

3. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207 с.
4. Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне. - Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 257 с.
5. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Определение функция ослабления поля земной волны при приеме на разных высотах полета самолета. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/8/text.pdf>
6. Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Нагуслева И.Б., Буянова Д.Г. Моделирование зоны обслуживания СВ-радиомаяка для передачи дифференциальных поправок ГНСС // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18, № 6. С. 8-14.
7. Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Дембелов М.Г. Нагуслева И.Б. Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г. Методы и результаты расчетов напряженности поля земной волны для ДВ-, СВ-,КВ- каналов связи на высокоширотных многокусочных импедансных трассах // Техника радиосвязи. Выпуск 1 (24). 2015. С. 3-15.
8. Hufford G.A. An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface // Quarterly of Applied Mathematics, 1952, Vol.9, pp. 391-404.
9. Проскурин Е.П., Пылаев А.А., Тихомиров Н.П., Штейнберг А.А. Распространение радиоволн над электрически и геометрически неоднородными трассами // Проблемы дифракции и распространения волн. - Л.: Изд-во ЛГУ, Вып.18. 1981. С. 171-183.

**Для цитирования:**

Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов, В. Б. Хаптанов, В. П. Мельчинов. Радиоволновые измерения в районе арктического поселка Тикси. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/5/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.5