УДК: 537.876.43 DOI: 10.26907/rwp29.2025.246-249

ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН НАД СИЛЬНОИНДУКТИВНОЙ СТРУКТУРОЙ «ЛЕД – СОЛЕНАЯ ВОДА»

М.Г. Дембелов, Ю.Б. Башкуев, С.Н. Бальхаев

Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: mdembelov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается поле земной волны над двухслойной средой «лед – соленая вода» при разных электрических свойствах льда и соленой воды. Расчеты функции ослабления выполняются по формулам Зоммерфельда для плоской поверхности Земли. Представлены измеренные значения модуля функции ослабления, полученные на льду оз. Соленое в 2009 и 2024 гг., когда условия распространения поля земной волны имели существенные отличия. Расчеты функции ослабления по измеренным значениям удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости соленой воды и толщине льда, а также подобранных значений удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости для льда оз. Соленое представляют модель выполненных измерений в зависимости от расстояния от излучателя.

Ключевые слова: поле земной волны; функция ослабления; сильноиндуктивный поверхностный импеданс; структура «лед – соленая вода»

EFFECTS OF HF RADIO WAVE PROPAGATION OVER A HIGHLY INDUCTIVE "ICE – SALT WATER" STRUCTURE

M.G. Dembelov, Y.B. Bashkuev, S.N. Balkhaev

Abstract. The ground wave field over a two-layer medium "ice – salt water" is considered for different electrical properties of ice and salt water. The attenuation function is calculated using the Sommerfeld formulas for a flat Earth surface. The measured values of the attenuation function modulus are presented, obtained on the ice of Lake Solenoe in 2009 and 2024, when the ground wave field propagation conditions were significantly different. The attenuation function calculations based on the measured values of the resistivity and relative permittivity of salt water and the ice thickness, as well as the selected values of the resistivity and relative permittivity for the ice of Lake Solenoe, represent a model of the measurements carried out depending on the distance from the transmitter.

Keywords: ground wave field; attenuation function; highly inductive surface impedance; “ice – salt water” structure

Введение

Рассматривается поле, создаваемое вертикальным электрическим диполем (ВЭД) над импедансной поверхностью. Монохроматическая электромагнитная волна зависит от времени τ в виде $\exp(-i\omega\tau)$, ω – циклическая частота. Приведенный поверхностный импеданс $\delta=|\delta|\cdot\exp(i\varphi\delta)$ представляет собой отношение тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей на границе раздела двух сред и обладает фазой φ_δ, имеющей пределы $-90° < \varphi_\delta < 90°$, при условии $|\delta^2|<<1$. Для случая однородной среды поверхностный импеданс находится в пределах сектора $0° < \varphi_\delta < -45°$. Сильноиндуктивная среда характеризуется поверхностным импедансом, у которого аргумент (фаза) φ_δ находится в пределах сектора $-45° < \varphi_\delta < -90°$. Такая среда в диапазоне ДВ-СВ-КВ радиоволн может определяться, например, двухслойной структурой, в которой нижний слой обладает очень хорошей проводимостью, а верхний слой близок к диэлектрику. Наиболее ярко обладающей свойствами сильноиндуктивной среды в указанном частотном диапазоне является зимняя Арктика, где на хорошо проводящей морской воде располагается плохопроводящий лед. В Забайкалье, где зимние температуры близки арктическим, удобным местом для выполнения экспериментальных работ с подобными арктическим условиями являются соленые озера. Пробы воды озера Соленое (N 51°21’48’’, E 106°33’50’’) показали, что значения удельного электрического сопротивления (УЭС) воды близки значениям УЭС морской воды. Толщина льда в конце зимы на оз. Соленое достигает 1 метра.

Электрические свойства структуры «лед-соленая вода»

Работы по измерению поля земной волны выполнены на льду оз. Соленое в марте 2024 г, аналогичные работы выполнялись в 2009 г. и 2020 г. [1-3]. В отличие от 2009 и 2020 гг. эксперименты в 2024 г. проводились в конце марта в более теплое время при температуре воздуха около +10°С. Бурение 2024 г. показало, что лед имел толщину примерно 80 см и представлял собой среднюю стадию таяния. Поэтому лед имел большую проводимость, чем у полностью замерзшего льда. Пробы воды оз. Соленое показали, что удельное сопротивление воды относительно наблюдений 2009 и 2020 гг. изменилось, но находится в пределах предыдущих измерений. На рис. 1 представлены температурные зависимости УЭС воды оз. Соленое. УЭС воды в озере примерно в 2–3 раза выше УЭС морской воды. Для температуры воды близкой к 0°С УЭС составило примерно 0,88 Ом·м. В 2009 г. УЭС воды при t ≈ 0°С составляло ρ = 1,05 Ом·м, а в 2020 г. – ρ = 0,8 Ом·м. Увеличение электропроводности (минерализации) воды озера к 2020 г. объясняется существенным уменьшением количества выпавших атмосферных осадков в течение 2009 – 2019 гг. Увеличение количества выпавших осадков с 2020 по 2023 гг. наоборот уменьшило электропроводность воды озера в 2024 г.

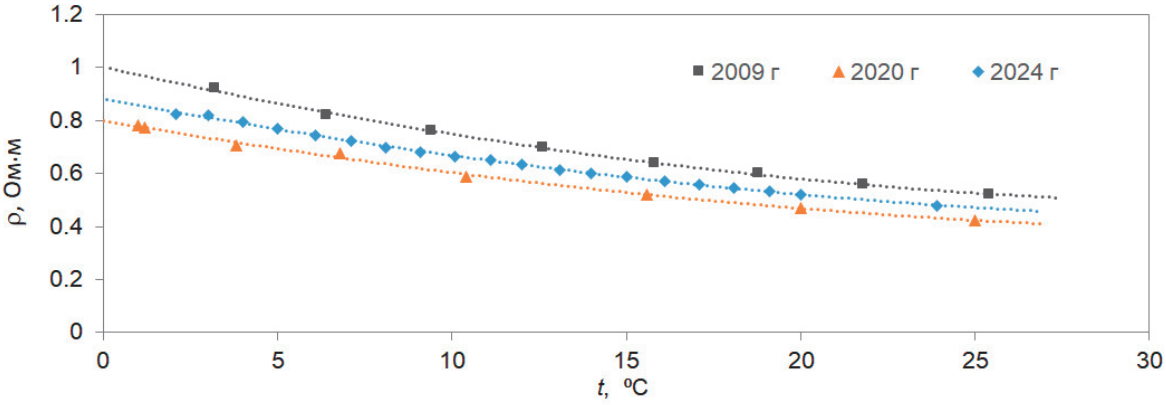

Рис. 1. Зависимости удельного электрического сопротивления воды оз. Соленое от температуры в 2009, 2020 и 2024 гг.

Рассмотрим УЭС воды для Баренцева моря и по пробам Соленого озера в разные годы, относительную диэлектрическую проницаемость для всех случаев примем равной $\varepsilon_В = 86$. УЭС воды Баренцева моря при температуре около 0 °С приблизительно равно ρ = 0,33 Ом·м. Для льда в расчетах примем электрические следующие свойства $\rho_л = 10^4$ Ом·м; $\varepsilon_л = 4$ [4]. В расчетах примем толщину льда во всех случаях равной 1 метру. Рассчитаны значения поверхностного импеданса для двухслойной структуры «лед-соленая вода» на частоте 10 МГц для разных электрических свойств соленой воды (таблица 1).

Таблица 1. Значения модуля и фазы поверхностного импеданса для структуры «лед – соленая вода» для частот 10 МГц

С учетом морской воды, |δ|/arg δ	С учетом пробы воды 2009 г., |δ|/arg δ	С учетом пробы воды 2020 г., |δ|/arg δ	С учетом пробы воды 2024 г., |δ|/arg δ
0,176/-85,4°	0,185/-82,6°	0,182/-83,4°	0,183/-83,2°

На рис. 2 представлены расчеты модуля |*W*| (а) и дополнительной фазы arg *W* (б) функции ослабления, выполненные с учетом приведенных в таблице 1 значений поверхностного импеданса по формулам Зоммерфельда [5]. Расчеты для всех импедансов показывают, что значения |*W*| значительно превышают единицу, для морской воды превышение достигает 3,9 раз. Такой эффект связан с наличием поверхностной волны для сильноиндуктивных структур. Модуль функции ослабления |*W*| сильно изменяется (рис. 2а, графики 1–4), на больших расстояниях после сильного роста наблюдается падение уровня поля с дальнейшим немонотонным убыванием.

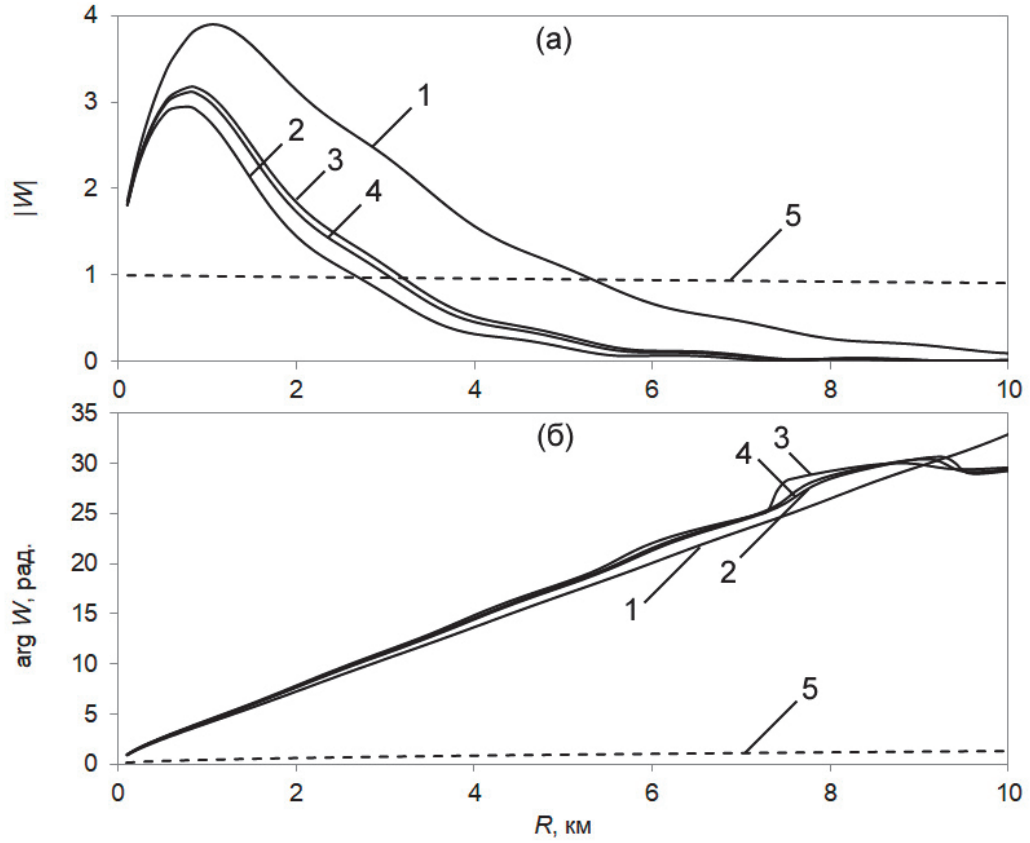

Рис. 2. Графики модуля (а) и дополнительной фазы (б) функции ослабления поля земной волны на частоте 10 МГц для различных сред:
1 – «лед – морская вода»; 2 – «лед – соленая вода (проба 2009 г)»; 3 – «лед – соленая вода (проба 2020 г)»; 4 – «лед – соленая вода (проба 2024 г)»; 5 – морская вода без льда

Сравнение расчетов с экспериментом

Удельное сопротивление морского льда зависит от частоты, температуры льда и содержания примесей. При температуре, близкой к 0°С, и частотах 10 ÷ 100 МГц у природного льда удельное сопротивление находится в пределах 10^2 ÷ 10^4 Ом·м. Относительная диэлектрическая проницаемость для чистого промерзшего льда находится в пределах 3 ÷ 4 [6]. К концу марта, когда заметно повышается температура воздуха, лед оз. Соленое постепенно подвергается насыщению соленой водой, поэтому удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость льда существенно изменяются. Значения УЭС воды оз. Соленое измерены прибором RLC-3003 для разных температур (рис. 1). На рис. 3 представлены графики измеренных значений модуля функции ослабления поля земной волны, возбуждаемого вертикальным диполем над ледовой поверхностью оз. Соленое на частоте 10 МГц. Измерения выполнены в начале марта 2009 г. при дневной температуре воздуха около t = -7°С и в конце марта 2024 г. при t = +10°С. Здесь же приведены рассчитанные значения |*W*| по формулам (3) и (5) с учетом подобранных электрических свойств двухслойной среды «лед – соленая вода». В таблице 2 приведены электрические параметры двухслойной среды и значения поверхностного импеданса, по значениям которых выполнены расчеты функции ослабления (рис. 3).

Таблица 2. Электрические параметры двухслойной среды «лед – соленая вода» и значения поверхностного импеданса

Измерения 2009 г.	Измерения 2024 г.
ρ_1 = 640 Ом·м; ε_1 = 5; h_1 = 1 м ρ_2 = 1,05 Ом·м; ε_2 = 86	ρ_1 = 115 Ом·м; ε_1 = 25; h_1 = 0,8 м ρ_2 = 0,88 Ом·м; ε_2 = 86
$\delta = 0{,}21\cdot\exp(-i75{,}8°)$	$\delta = 0{,}224\cdot\exp(-i66{,}1°)$

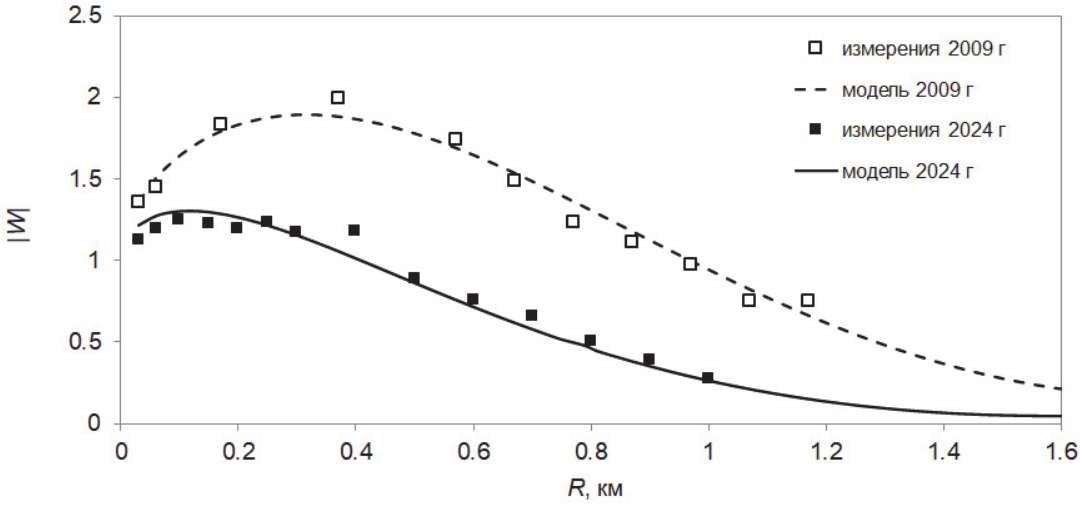

Рис. 3. Графики измеренных значений модуля функции ослабления на частоте 10 МГц в зависимости от расстояния в 2009 и 2024 гг., а также графики модельных расчетов |*И*| с учетом рассчитанных значений поверхностного импеданса (таблица 2)

Заключение

Расчеты показали, что слоистые подстилающие среды весьма существенно влияют на процесс распространения радиоволн. Особенно сильно при этом проявляются эффекты для сильноиндуктивных импедансов, когда имеет место присутствие поверхностной электромагнитной волны. Двухслойная структура в виде арктического льда, лежащем на хорошо проводящей морской воде, представляет собой наиболее характерную сильноиндуктивную импедансную среду в диапазоне ДВ-СВ-КВ радиоволн. Выполненные измерения показали, что для хорошо промерзшего льда (начало марта 2009 г.) на частоте 10 МГц фаза импеданса достигает –75,8° при модуле |δ| = 0,21, а для льда на средней стадии таяния (конец марта 2024 г.) она равна приблизительно –66,1° при модуле |δ| = 0,224.

Слоистая структура подстилающей среды оказывает существенное влияние на процесс распространения радиоволн, и ее необходимо учитывать при определении уровня и фазы поля при разработке и использовании систем радиосвязи, радионавигации, систем точного времени, где применяется поле земной волны.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физического материаловедения СО РАН по теме № 0270-2024-0008 «Развитие радиофизических методов исследования динамики поверхности суши, водоемов и атмосферы Земли в СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и СВЧ диапазонах радиоволн».

Список литературы

1. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Экспериментальное доказательство существования поверхностной электромагнитной волны // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – №. 3. – С. 88–95.
2. Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Хаптанов В.Б. Поверхностная электромагнитная волна над сильноиндуктивной средой «лед-соленая вода» // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – № 8–9. – С. 611–615.
3. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б. Прогнозирование распространения длинных, средних и коротких радиоволн над импедансной структурой «лед-море» // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – № 6. – С. 541–546.
4. Пылаев А.А., Тамкун Л.Г., Трегубов А.Г. // XVII Межведомственный Семинар по распространению километровых и более длинных радиоволн. – 1991. – С. 64–65.
5. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. – Наука, 1991. – 196 с.
6. Паундер Э. Физика льда. – М: Мир, 1968. – 190 с.