

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.4 УДК: 538.566

# ОСЛАБЛЕНИЕ ПОЛЯ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ НАД СИЛЬНОИНДУКТИВНОЙ СТРУКТУРОЙ «ЛЕД – СОЛЕНАЯ ВОДА»

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

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

Статья поступила в редакцию 4 марта 2025 г.

Аннотация. Рассматривается поле земной волны над сильноиндуктивной поверхностью в виде двухслойной среды «лед – соленая вода». Показаны рассчитанные графики сильных вариаций модуля и дополнительной фазы функции ослабления поля земной волны в зависимости от численного расстояния, когда при фиксированном значении модуля фаза поверхностного импеданса изменяется от -30 до -89 градусов. 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. Выполненные моделирования модуля функции ослабления позволили оценить электрические свойства льда.

Ключевые слова: поле земной волны, функция ослабления, сильноиндуктивный поверхностный импеданс, структура «лед – соленая вода». Финансирование: 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». Автор для переписки: Дембелов Михаил Георгиевич, mdembelov@mail.ru

### Введение

Теории большое распространения земных радиоволн посвящено количество публикаций, среди которых наиболее важными являются ранние работы Зоммерфельда [1], Вейля [2], Ватсона [3], Фока [4]. Начатая этими радиофизиками теория была продолжена другими исследователями, которые предложили новые пригодные для практического применения формулы. Существенный вклад в этом направлении для случая распространения над однородной средой внесли Нортон [5], Введенский [6], Бремер [7], Щукин [8] и другие. В работах Г.И. Макарова [9] и Дж. Уайта [10] приведены фундаментальные теоретические исследования для радиотрасс с произвольным поверхностным импедансом, который соответствует всем физически возможным подстилающим слоистым структурам, В том числе сильноиндуктивным. Е.Л. Фейнберг предложил модель с изменяющимся вдоль распространения электрических свойств радиотрассы [11]. В работах [12-14] описаны эксперименты по определению уровня напряженности поля над сильноиндуктивной средой «лед-соленая вода» в КВ диапазоне, было показано четкое проявление эффекта поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ).

Рассматривается поле, создаваемое вертикальным электрическим диполем (ВЭД) над импедансной поверхностью. Монохроматическая электромагнитная волна зависит от времени  $\tau$  в виде  $\exp(-i\omega\tau)$ ,  $\omega$  – циклическая частота. Приведенный поверхностный импеданс  $\delta = |\delta| \exp(i\varphi_{\delta})$  представляет собой отношение тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей

#### <u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №6, 2025</u>

на границе раздела двух сред и обладает фазой фъ, имеющей пределы - $90^{\circ} < \phi_{\delta} < 90^{\circ}$ , при условии  $|\delta^2| << 1$ . Для случая однородной среды поверхностный импеданс находится в пределах сектора  $0^{\circ} < \phi_{\delta} < -45^{\circ}$ . Сильноиндуктивная среда характеризуется поверхностным импедансом, у которого аргумент (фаза)  $\phi_{\delta}$  находится в пределах сектора -45° <  $\phi_{\delta}$  < -90°. Такая среда в диапазоне ДВ-СВ-КВ радиоволн может определяться 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 (N51°21'48'', E106°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.

# 1. Асимптотические представления для функции ослабления

Для случая плоской поверхности, когда не учитывается кривизна Земли, расчет функции ослабления поля земной волны выполняется по формуле Зоммерфельда [1, 9] при наземном расположении обоих корреспондирующих пунктов. В свое время автор формулы вывел ее в предположении однородной по глубине земной поверхности. Однако позднее Уайт [10] и Макаров [15] показали, что формула Зоммерфельда может быть успешно применима для случаев слоистых подстилающих сред.

Вертикальная составляющая электрического поля  $E_z$  в зависимости от расстояния R от передатчика представляется в виде:

$$E_{z}(R) = \frac{k^{2}P}{2\pi\varepsilon_{0}} \left| W(R) - \frac{1}{ikR} + \frac{1}{\left(ikR\right)^{2}} \right| \frac{\exp[ikR + i\varphi_{\partial on}(R)]}{R}, \qquad (1)$$

где 
$$\varphi_{\partial on}(R) = \arg \left[ W(R) - \frac{1}{ikR} + \frac{1}{\left(ikR\right)^2} \right].$$
(2)

Здесь W(R) – функция ослабления поля земной волны;  $\Phi_{don}(R)$  – дополнительная фаза для диполя над трассой распространения; k – волновое число в вакууме; P – полный дипольный момент источника;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\frac{1}{ikR}$  – индукционный,  $\frac{1}{(ikR)^2}$  – статический члены, участвующие в «формировании» поля на расстоянии одной-трех длин волн от источника [9]. Функция ослабления W(R) может быть представлена в зависимости от численного расстояния *SR*, где *S* = *ik* $\delta^2/2$ , в виде [1, 9]:

$$W(SR) = 1 + i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR) - 2\exp(-SR) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(SR)^{n+1}}{n!(2n+1)}.$$
 (3)

Данное разложение сходится при всех значениях *SR*. Формула (3) применяется для малых значений модуля численного расстояния, когда 0 < |SR| < 10.

Для больших значений модуля численного расстояния ( $|SR| \ge 10$ ) для емкостных и слабоиндуктивных импедансов (Im  $S^{1/2} > 0$  или arg  $\delta > -\pi/4$ ) применяется асимптотическое разложение по степеням величины  $\frac{1}{2SR}$  [9]:

$$W(SR) = -\sum_{n=1}^{N} \frac{(2n-1) !!}{(2SR)^{n}},$$
(4)

Для сильноиндуктивных импедансов (Im  $S^{1/2} < 0$  или arg  $\delta < -\pi/4$ ) формула для функции ослабления записывается в виде:

$$W(SR) = 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR) - \sum_{n=1}^{N} \frac{(2n-1) !!}{(2SR)^{n}}.$$
 (5)

В формулах (4) и (5) суммирование ограничивается номером *N*, при котором достигается достаточная точность значения функции ослабления. На практике в формуле (4) достаточно учитывать 7 первых членов ряда:

$$W \approx -\frac{1}{2SR} \left[ 1 + \frac{1}{2SR} \left[ 3 + \frac{1}{2SR} \left[ 15 + \frac{1}{2SR} \left[ 105 + \frac{1}{2SR} \left[ 945 + \frac{1}{2SR} \left[ 10395 + \frac{1}{2SR} 135135 \right] \right] \right] \right] \right] \right].$$

В формуле (5) при Im  $S^{1/2} < 0$  присутствует член  $W_{\Pi OB} = 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR)$ , который отвечает ПЭВ и возникает вследствие разрыва контура интегрирования при пересечении оси Im S = 0 [9].

На рис. 1 а,б показаны графики зависимостей модуля и аргумента функции ослабления от модуля численного расстояния |SR/ для разных значений фазы поверхностного импеданса ф и фиксированного значения модуля импеданса. При сильноиндуктивных импедансах подстилающих сред из-за ПЭВ на некоторых расстояниях от источника значения |W| превышают единицу. То есть, на этих расстояниях уровень поля при arg  $\delta < -\pi/4$  оказывается больше, чем над идеально проводящей средой. Например, уровень поля над средой с параметром фазы arg  $\delta = -89^{\circ}$  будет превышать уровень поля над идеально проводящей поверхностью в 8 раз! При увеличении значений |SR/ влияние ПЭВ по амплитуде уменьшается, причем это уменьшение происходит быстрее волны, описываемой вторым членом в уравнении (5). С увеличением расстояния обе волны распространяются с разными скоростями, становятся близки по своей амплитуде, и из-за интерференции проявляется эффект немонотонного убывания модуля функции ослабления. На рис. 1а для arg  $\delta = -75^{\circ}$  можно наблюдать первый минимум *W*, вызванный интерференцией двух волн, описываемых соответственно первым и вторым членами в формуле (5). Кривые модуля функции ослабления для arg  $\delta < -75^{\circ}$  будут иметь свой первый и последующие минимумы при |SR| > 20. Дополнительная фаза arg W для слабоиндуктивных импедансов незначительно изменяется в зависимости от |SR/. Но при сильноиндуктивных значениях импеданса она проявляет значительные изменения с расстоянием.



Рис. 1. Зависимости модуля (а) и дополнительной фазы (б) функции ослабления поля земной волны от модуля численного расстояния |*SR*| для разных значений аргумента (фазы) поверхностного импеданса: -30°...-89°.

# 2. 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. [12-14]. В отличие от 2009 и 2020 гг. эксперименты в 2024 г. проводились в конце марта в более теплое время при температуре воздуха около +10°C. Бурение 2024 г. показало, что лед имел толщину примерно 80 см. Ниже 15 см пробуренная лунка постепенно заполнялась водой сбоку ледяной толщи, поэтому лед был в средней стадии таяния и имел большую проводимость, чем у полностью замерзшего льда. Пробы оз. Соленое показали, что удельное сопротивление воды воды относительно наблюдений 2009 и 2020 гг. изменилось, но находится в пределах измерений. На рис. 2 представлены предыдущих двух 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  $t \approx 0^{\circ}$ С составляло  $\rho = 1,05$  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. (рис. 3). Увеличение количества выпавших осадков с 2020 по 2023 гг. наоборот уменьшило электропроводность воды озера в 2024 г.



Рис. 2. Зависимости удельного электрического сопротивления воды оз. Соленое от температуры в 2009, 2020 и 2024 гг.





Расчет поверхностного импеданса двухслойной среды в зависимости от частоты выполняется по формуле [16]:

$$\delta = \delta_1 \frac{1 - R_{12} \exp(-2k_0 h_1 \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta})}{1 + R_{12} \exp(-2ik_0 h_1 \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2 \theta})}, \qquad (6)$$

где  $R_{12} = (\delta_1 - \delta_2)/(\delta_1 + \delta_2)$  – коэффициент отражения на границе раздела сред;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – импедансы 1-го и 2-го слоев;  $h_1$  – толщина 1-го слоя;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – волновое число в вакууме;  $\lambda$  – длина волны;  $\varepsilon_{1K} = \varepsilon_1 + i60\lambda\sigma_1$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость 1-го слоя;  $\varepsilon_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость 1-го слоя; σ<sub>1</sub> – проводимость 1-го слоя; θ – угол падения волны на границу раздела сред «воздух-земля». Для упрощения в расчетах угол падения волны принят равным 90°.

Рассмотрим УЭС воды для Баренцева моря и по пробам Соленого озера в разные годы, относительную диэлектрическую проницаемость для всех случаев примем равной  $\varepsilon_{\rm B} = 86$ . УЭС воды Баренцева моря при температуре около 0°С приблизительно равно  $\rho = 0,33$  Ом·м. Для льда в расчетах примем электрические следующие свойства  $\rho_{\rm n} = 10^4$  Ом·м;  $\varepsilon_{\rm n} = 4$  [17]. В расчетах примем толщину льда во всех случаях равной 1 метру. По формуле (6) рассчитаны значения поверхностного импеданса для соленой воды и для двухслойной структуры «лед-соленая вода» для частот 5 и 10 МГц (таблица 1). На частоте 10 МГц для слоистой среды фаза импеданса имеет меньшее значение для всех случаев, поэтому на этой частоте будут сильнее проявляться эффекты ПЭВ.

Таблица 1. Значения модуля и фазы поверхностного импеданса для соленой воды и структуры «лед – соленая вода» для частот 5 и 10 МГц.

	соленая вода				«лед – соленая вода»			
	морская вода	пробы воды 2009 г.	пробы воды 2020 г.	пробы воды 2024 г.	«лед – морская вода»	с учетом проб 2009 г.	с учетом проб 2020 г.	с учетом проб 2024 г.
5 МГц	0,009/-44,8°	0,017/-44,3°	0,015/-44,4°	0,016/-44,4°	0,087/-83,7°	0,093/-80,6°	0,091/-81,4°	0,092/-81,1°
10 МГц	0,014/-44,5°	0,024/-43,5°	0,021/-43,9°	0,022/-43,8°	0,176/-85,4°	0,185/-82,6°	0,182/-83,4°	0,183/-83,2°

На рис. 4 представлены зависимости модуля (а) и дополнительной фазы (б) функции ослабления от расстояния, выполненные с учетом приведенных в таблице 1 значений поверхностного импеданса на частоте 10 МГц по формулам (3), (4) и (5). Расчеты показывают, что поле над Баренцевым морем без льда претерпевает меньшее ослабление, так как УЭС морской воды меньше, чем у озера Соленое. На расстоянии 10 км разница между ними не превышает 19 %. Дополнительная фаза функции ослабления поля над морем меньше, чем над соленым озером. Разница находится в пределах 0,5 радиана.





1 – «лед – морская вода»; 2 – «лед – соленая вода (проба 2009 г)»;
3 – «лед – соленая вода (проба 2020 г)»;
4 – «лед – соленая вода (проба 2009 г)»; 5 – морская вода;
6 – соленая вода (проба 2009 г)»; 7 – соленая вода (проба 2020 г)»;
8 – соленая вода (проба 2024 г)».

Расчеты |W| и arg W над соленым озером без льда в разные годы показали незначительные вариации, для модуля функции ослабления на расстоянии 10 км отличия находились в пределах 13 % (рис. 4а, графики 6-8), для дополнительной фазы – в пределах 0,15 радиана (рис. 4б, графики 6-8). При распространении над структурой «лед – соленая вода» для всех случаев значения |W| значительно превышают единицу, для морской воды превышение достигает 3,9 раз. Такой эффект связан с наличием поверхностной волны для сильноиндуктивных импедансов, которые возникают для двухслойной структуры «лед – соленая вода». На больших расстояниях после сильного роста наблюдается падение уровня поля. Для двухслойной среды «лед – соленая вода», когда

#### <u>ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, eISSN 1684-1719, №6, 2025</u>

рассматриваются пробы воды оз. Соленое в разные годы, модуль и фаза -82,6° ÷ -83,4° незначительно  $0.182 \div 0.185$ И импеданса изменяются соответственно. Однако, модуль функции ослабления |W| при этом заметно изменяется (рис. 4а, графики 2-4). После сильного роста наблюдется немонотонное убывание графиков с расстоянием. Это связано с тем, что в формуле (5) первый член отвечает поверхностной волне, а второй – пространственной. Распространяясь с разными скоростями, эти волны испытывают интерференцию. Поведение зависимости дополнительной фазы от расстояния для структуры «лед – соленая вода» отмечается протяженным участком ее сильного роста. Здесь так же наблюдается эффект интерференции двух волн (рис. 4б, графики 2-4).

### 3. Ослабление поля над структурой «лед – соления вода»

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<sup>2</sup> ÷ 10<sup>4</sup> Ом м. Относительная диэлектрическая проницаемость для чистого промерзшего льда находится в пределах  $3 \div 4$  [18]. 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. 2). На рис. 5 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  $t = -7^{\circ}$ C и в конце марта 2024 г. при  $t = +10^{\circ}$ C. 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. 5).

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

Измерения 2009 г.	Измерения 2024 г.
ρ <sub>1</sub> = 640 Ом·м; ε <sub>1</sub> = 5; h <sub>1</sub> = 1 м	ρ <sub>1</sub> = 115 Ом·м; ε <sub>1</sub> = 25; h <sub>1</sub> = 0,8 м
ρ <sub>2</sub> = 1,05 Ом·м; ε <sub>2</sub> = 86	ρ <sub>2</sub> = 0,88 Ом⋅м; ε <sub>2</sub> = 86
$\delta = 0,21 \cdot \exp(-i75,8^{\circ})$	$\delta = 0,224 \cdot \exp(-i66,1^{\circ})$



Рис. 5. Графики измеренных значений модуля функции ослабления на частоте 10 МГц в зависимости от расстояния в 2009 и 2024 гг., а также графики модельных расчетов |*W*| с учетом рассчитанных значений поверхностного импеданса (таблица 2).

### Заключение

Рассмотрено распространение земной волны на частоте 10 МГц над плоской поверхностью, обладающей произвольными физически возможными значениями поверхностного импеданса. 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.

Замерзшее оз. Соленое с хорошо проводящей водой и толщиной льда до 1 метра может служить аналогом ледового арктического поля. Выполнены измерения модуля функции ослабления на льду оз. Соленое в 2009 и 2024 гг. на частоте 10 МГц. Результаты измерений показали характерные изменения модуля функции ослабления с расстоянием, свойственные наличию поверхностной электромагнитной волны.

По измеренным электрическим параметрам воды и толщине льда, а также подобранных значений удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости для льда (2009 г. –  $\rho_{ЛЕД} = 640$  Ом·м,  $\varepsilon_{ЛЕД} = 5$ ; 2024 г. –  $\rho_{ЛЕД} = 115$  Ом·м,  $\varepsilon_{ЛЕД} = 25$ ) определены значения поверхностного импеданса для 2009 и 2024 гг., по которым моделируются результаты измерений модуля функции ослабления над ледовой трассой оз. Соленое. Определено, что для хорошо промерзшего льда (начало марта 2009 г.) на частоте 10 МГц фаза импеданса достигает -75,8° при модуле  $|\delta| = 0,21$ , а для льда на средней стадии таяния (конец марта 2024 г.) она равна приблизительно -66,1° при модуле  $|\delta| = 0,224$ .

Функция ослабления над слоистой сильноиндуктивной поверхностью в основном характеризуется присутствием поверхностной электромагнитной волны. Экспериментально и теоретически показано, что 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.

Финансирование: 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».

# Литература

- 1. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie // Annalen der Physik. – 1926. – T. 386. – №. 25. – C. 1135-1153.
- Weyl H. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen über einem ebenen Leiter // Annalen der Physik. – 1919. – T. 365. – №. 21. – C. 481-500.
- Watson G.N. The diffraction of electric waves by the earth // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1918. – T. 95. – №. 666. – C. 83-99.
- 4. Фок В.А. Дифракция радиоволн вокруг земной поверхности. М: Изд-во АН СССР, 1946. 80 с.
- 5. Norton K.A. The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere // Proc. Inst. Radio Eng. 1936. T. 24. C. 1360-1378.
- Введенский Б.А. Основы теории распространения радиоволн.
   Распространение в однородной атмосфере. М: Гостехтеоретиздат, 1934.
   227 с.
- Bremmer H. Applications of operational calculus to ground-wave propagation, particularly for long waves //IRE Transactions on Antennas and Propagation.
   - 1958. - T. 6. - №. 3. - C. 267-272.
- 8. Щукин А.Н. Распространение радиоволн. М: Союзиздат, 1940. 400 с.
- 9. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. Наука, 1991. 196 с.
- 10. Wait J.R. Electromagnetic waves in stratified media. Pergamon Press, 1970.
- 11. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.
   АН СССР, 1961. 546 с.
- 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. https://doi.org/10.1134/S1063785010020136

- 13. 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. https://doi.org/10.52452/00213462 2021 64 08 611
- 14. 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. https://doi.org/10.31857/S0033849424060052
- 15. Макаров Г.И., Новиков В.В. Распространение электромагнитных волн над поверхностью с произвольным поверхностным импедансом // Проблемы дифракции и распространения волн. – Л: Изд-во ЛГУ, 1962. Вып. 1. – С. 95-115.
- Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Изд-во СО РАН, 1996. 208 с.
- Пылаев А.А., Тамкун Л.Г., Трегубов А.Г. // XVII Межведомственный Семинар по распространению километровых и более длинных радиоволн. – 1991. – С. 64-65.
- 18. Паундер Э. Физика льда. М: Мир, 1968. 190 с.

# Для цитирования:

Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Бальхаев С.Н. Ослабление поля земной волны над сильноиндуктивной структурой «лед – соленая вода» // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 6. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.4