

УДК 537.86

ЧАСТОТНЫЙ КРИТЕРИЙ ПОЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НАД СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ЛЁД—СОЛЁНАЯ ВОДА

Ю. Б. Башкуев*, Л. Х. Ангархаева, И. Б. Нагуслева, В. Б. Хаптанов,
М. Г. Дембелов, Д. Г. Буянова

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Предложен и теоретически и экспериментально обоснован частотный критерий появления поверхностной электромагнитной волны над слоистой структурой лёд—солёная вода. Установлено, что слой льда на море увеличивает модуль поверхностного импеданса и смещает его фазу в область, соответствующую сильно индуктивным импедансам (с фазой до -88°). Показано, что из-за наличия тонкого плохо проводящего слоя льда на море в импедансе двухслойной среды появляется добавка к импедансу морской воды, линейно зависящая от толщины слоя льда и смещающая фазу импеданса в область, соответствующую сильной индукции. При этом электрические свойства слоя льда почти не влияют на изменение импеданса. Слой льда существенно влияет на электромагнитное поле, которое над покрытым льдом морем может быть больше, чем поле над бесконечно проводящей плоскостью. Эффект увеличения поля обусловлен поверхностной электромагнитной волной.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] экспериментально доказано существование поверхностной электромагнитной волны над слоистой структурой лёд—солёное озеро. В статьях [2, 3] рассмотрены природные и искусственные структуры с сильно индуктивным поверхностным импедансом и солёные озера как электромагнитные аналоги морских акваторий в диапазонах очень низких, низких и сверхвысоких частот. Закономерности распространения радиоволн над реальной земной поверхностью детально исследованы в работах [4–6]. Установлено, что длинные и средние радиоволны в дневное время распространяются в виде земной волны. На поле земной волны оказывают влияние неоднородность электрических свойств как подстилающей среды вдоль трассы распространения, так и по глубине среды, а также неровности рельефа, растительность и ледовый покров. Неоднородность электрических параметров по глубине учитывают с помощью поверхностного импеданса δ подстилающей среды, который определяется путём измерений или расчётов по параметрам геоэлектрического разреза [7]. Глубина проникновения поля в слоистую среду зависит от этих параметров и длины волны λ (в нашем случае $\lambda \approx 30 \div 10\,000$ м) и составляет $3 \div 30$ м. Земная волна, амплитудно-фазовая структура которой практически не меняется во времени, часто используется при расчёте дальности действия радиолиний в диапазонах низких и средних частот. Расчёты условий распространения электромагнитных волн в пространстве и времени проводятся на основе данных о среде, над которой распространяются волны. На трассах над покрытым льдом морем наиболее адекватной моделью подстилающей среды для расчётов основной характеристики процесса распространения радиоволн — функции ослабления W — является горизонтально-слоистая структура с частотно-независимыми (или частотно-зависимыми) электрическими параметрами в каждом слое. Эта модель хорошо соответствует реальной среде, имеющей в основном горизонтальную стратификацию слоёв. Точность расчётов определяется степенью соответствия реальной среды использованной для расчётов поля модели, погрешностью методов локальных измерений

* buddich@mail.ru

электрических свойств среды и точностью теоретических расчётов характеристик поля для принятой модели среды [6].

1. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхностный импеданс δ зависит от структуры подстилающей среды [2, 4–6]. Различают следующие импедансные структуры [6]:

- 1) сильно индуктивные ($\text{Im } \delta < 0$, $|\text{Im } \delta| > \text{Re } \delta$),
- 2) слабо индуктивные ($\text{Im } \delta < 0$, $|\text{Im } \delta| < \text{Re } \delta$),
- 3) слабо ёмкостные ($\text{Im } \delta > 0$, $|\text{Im } \delta| < \text{Re } \delta$),
- 4) сильно ёмкостные ($\text{Im } \delta > 0$, $|\text{Im } \delta| > \text{Re } \delta$).

Двухслойные среды типа изолятор—проводник (изолятор на проводнике) и проводник—изолятор с сильно отличающимися величинами электропроводности σ_j и диэлектрической проницаемости ε_j слоёв, где индекс $j = 1, 2$ соответствует номеру слоя, позволяют изменять импеданс от сильно индуктивных до сильно ёмкостных значений (фаза импеданса δ меняется в пределах $-90^\circ < \varphi_\delta < 90^\circ$). Сильно-индуктивную область разделяют на подобласти с относительно слабой ($-72^\circ 40' < \varphi_\delta < -45^\circ$) и относительно сильной ($-90^\circ < \varphi_\delta < 72^\circ 40'$) индуктивностью. В последней имеются критические фазы импеданса $\varphi_{\text{cr}} = -80^\circ$ и $\varphi_{\text{cr}} = -83^\circ 30'$. Все эти случаи реализуются только при $|\varepsilon_1| < |\varepsilon_2|$.

Известно, что структуры типа диэлектрик—проводник обладают сильно индуктивным поверхностным импедансом [5]. На севере России сильно индуктивным импедансом характеризуются области вечной мерзлоты [8]. В Северном Ледовитом океане такой структурой является покрытая льдом морская вода (структура лёд—солёная вода), а в Сибири — многочисленные солёные озера в зимнее время, в частности озеро Сульфатное [1, 3]. В классе природных слоистых сред примером сильно индуктивной структуры является двухслойная среда лёд—море. На акватории мирового океана льды с толщиной от 0,5 до 5–7 м покрывают площадь свыше 26 миллионов квадратных километров. Обзор литературы по арктическим акваториям показал, что электромагнитные характеристики слоистых структур типа лёд—море с резко отличающимися электрическими свойствами слоёв и процессы распространения радиоволн над такими структурами исследованы недостаточно полно и глубоко. Такие исследования актуальны, в частности, при поисках природных усилителей электромагнитного поля.

Рассмотрим детальнее поверхностный импеданс слоистой среды лёд—море для типичных электрических свойств и толщин льда. Методика расчётов основана на использовании приведённого поверхностного импеданса плоской волны на поверхности горизонтально-слоистой структуры, с помощью которого можно учесть влияние подстилающей среды на распространение радиоволн [4–7]:

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

где E_τ и H_τ — горизонтальные взаимно перпендикулярные компоненты электрического и магнитного полей на границе раздела воздух—земля соответственно, $Z_0 = 377$ Ом — характеристический импеданс свободного пространства (вакуума). Для расчётов использовано выражение приведённого поверхностного импеданса многослойной плоско-параллельной структуры [4–6], которое в случае двух слоёв имеет вид

$$\delta = \delta_1 \frac{1 - R_{12} \exp(-i2k_{1z}h_1)}{1 + R_{12} \exp(-i2k_{1z}h_1)},$$

где

$$R_{12} = \frac{\delta_1 \alpha_2^+ - \delta_2 \alpha_2^-}{\delta_1 \alpha_2^+ + \delta_2 \alpha_2^-}$$

— коэффициент отражения на границе раздела воздух—среда, $\alpha_1^+ = 1 + R_{12} \exp(-i2k_{1z}h_1)$, $\alpha_1^- = 1 - R_{12} \exp(-i2k_{1z}h_1)$, $k_{jz} = k \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \Theta}$, $k = 2\pi/\lambda$, $\delta_j = \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \Theta} / \varepsilon_j$, $\alpha_2^+ = \alpha_2^- = 0$, $\varepsilon_j = \varepsilon_j + 60i\lambda\sigma_j$ — относительная комплексная диэлектрическая проницаемость, h_j — толщина j -го слоя, Θ — угол падения плоской волны на границу раздела, электрическое поле которой лежит в плоскости падения. В расчётах принято, что поле монохроматической электромагнитной волны зависит от времени по закону $\exp(-i\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$, f — частота излучения. Приведённые соотношения позволяют рассчитать частотные зависимости поверхностного импеданса многослойных сред.

Согласно теории распространения радиоволн [4, 5] поле над сильно индуктивной поверхностью на некоторых расстояниях может быть больше, чем над бесконечно проводящей плоскостью. При этом появляется поверхностная электромагнитная волна. Эта волна, поле которой экспоненциально затухает с высотой, представляет практический интерес, т. к. её энергия убывает обратно пропорционально расстоянию от источника, в то время как энергия объёмной электромагнитной волны убывает обратно пропорционально квадрату этого расстояния. Рассмотрим этот вопрос подробнее для поля вертикального электрического излучателя. В статье [1] экспериментально доказано существование поверхностной электромагнитной волны над двухслойной импедансной поверхностью лёд—солёная вода на акватории озера Сульфатное. Толщина слоя льда в точке расположения излучателя составляла 1 м при глубине озера 7 м. Удельное электрическое сопротивление солёной воды равно $\rho = 1,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, её электропроводность $\sigma = 1/\rho$ составляла $0,9 \text{ См/м}$. Скин-слой на частотах 10 и 15 МГц при такой электропроводности не превышает 0,17 м. Таким образом, подстилающую среду для трассы распространения радиоволн по всей длине можно считать двухслойной (лёд—солёная вода) с толщиной льда 1 м и глубиной воды до 7 м. На частотах 10 и 15 МГц слой льда с толщиной 1 м можно считать тонким, при этом поверхностный импеданс двухслойной структуры лёд—солёная вода попадает в сильно индуктивную область. Расчёты поверхностного импеданса дали следующие значения: $|\delta| = 0,185$, $\arg \delta = -82,5^\circ$ при $f = 10 \text{ МГц}$ и $|\delta| = 0,291$, $\arg \delta = -82,8^\circ$ при $f = 15 \text{ МГц}$. Модуль $|E_v|$ вертикальной составляющей электрического поля связан с модулем $|W|$ функции ослабления формулой

$$|E_v| = \frac{300\sqrt{P}}{R} \left| W(SR) - \frac{1}{ikR} + \frac{1}{(ikR)^2} \right|,$$

где P — мощность излучения, R — расстояние от источника поля до точки приёма, $1/(ikR)$ и $1/(ikR)^2$ — индукционный и статический члены соответственно, которые отвечают за формирование поля в ближней зоне излучателя. Для плоской модели подстилающей среды $S = ik\delta^2/2$ при $|\delta|^2 \ll 1$, $W(SR)$ — функция ослабления поля относительно случая бесконечно проводящей плоскости:

$$W(SR) = 1 + 2\sqrt{SR} \exp(-SR) \int_{\sqrt{SR}}^{+\infty} \exp(z^2) dz.$$

При больших значениях $|SR|$, учитывая разложение интеграла вероятности $\int_{\sqrt{SR}}^{+\infty} \exp(z^2) dz$, имеем

$$W(SR) = \begin{cases} -\sum_{n=1}^N \frac{(2n-1)!!}{(2SR)^n}, & \text{Im } \sqrt{S} \geq 0; \\ 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR) - \sum_{n=1}^N \frac{(2n-1)!!}{(2SR)^n}, & \text{Im } \sqrt{S} \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Функция ослабления W над сильно индуктивной плоской поверхностью содержит член $W_{\text{surf}} = 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR)$, соответствующий поверхностной волне. Максимум функции $|W_{\text{surf}}|$, равный

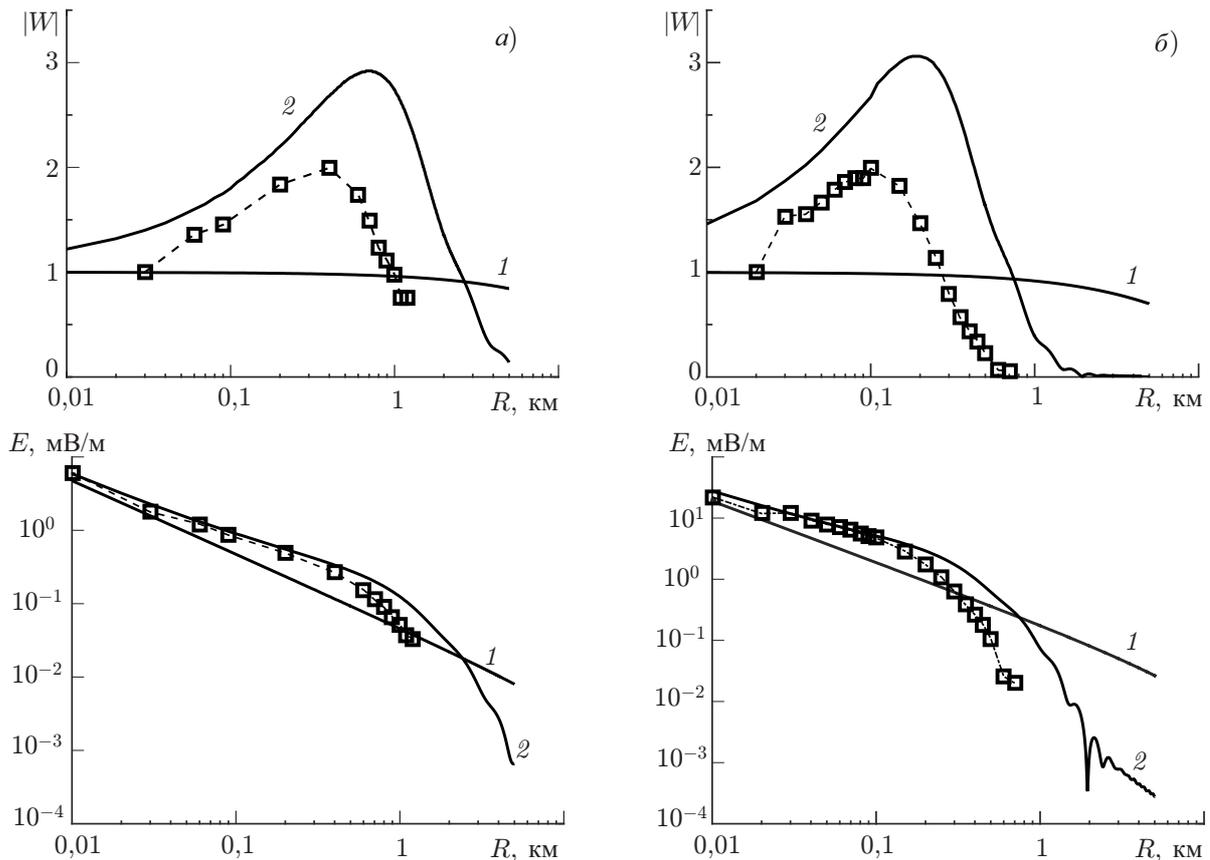


Рис. 1. Зависимость модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E от расстояния R на частотах 10 МГц (а) и 15 МГц (б). Сплошные линии соответствуют расчёту (1 — радиотрасса над солёной водой, 2 — радиотрасса над структурой лёд—солёная вода), символы \square — эксперименту

$|W_{\text{surf}}| = 2 \sqrt{\pi |S| R} \exp(-kR |\text{Im } \delta| \text{Re } \delta)$, отвечает расстоянию

$$R_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4\pi \text{Re } \delta |\text{Im } \delta|}.$$

В частности, при $\lambda = 30$ м и $\delta = 0,185 \exp(-1,440i)$ расчёты дают $R_{\text{max}} = 540$ м и $|W_{\text{surf}}| = 2,91$, а при $\lambda = 20$ м и $\delta = 0,291 \exp(-1,445i)$ имеет $R_{\text{max}} = 151$ м и $|W_{\text{surf}}| = 3,05$. На расстояниях $R \gg R_{\text{max}}$ поверхностная волна экспоненциально затухает и имеет место единая асимптотическая формула $W(SR) = -1/(2SR)$. Интерференция между объёмной и поверхностной волнами вызывает также осцилляции поля. Измерения напряжённости поля E_v и модуля $|W|$ функции ослабления проведены методом радиокомпарирования. На рис. 1 представлены для сравнения результаты измерений и расчётов поля. Из графиков видно качественное соответствие расчётных и измеренных значений как электрического поля, так и модуля функции ослабления. На частотах 10 и 15 МГц отчётливо выделяются значения $|W|$, превышающие единицу и достигающие $|W| \approx 2$, которые отвечают поверхностной волне. Сравнение теоретических и экспериментальных значений E_v показывает, что в излучении вертикального диполя содержится волна, амплитуда которой убывает с расстоянием R примерно как $1/R^{1/2}$, что соответствует расходимости поверхностной волны. Таким образом, эксперимент по распространению электромагнитных волн декаметрового диапазона (соответствующие частоты 10÷15 МГц), возбуждаемых вертикальным диполем над покрытой льдом поверхностью солёного озера на трассе с протяжённостью до 1,2 км, доказыва-

Таблица 1. Зависимости величин $|\delta|$, φ_δ , $\text{Re } \delta$ и $\text{Im } \delta$ от толщины льда на частотах 300 и 1000 кГц

h_i , м	$f = 300$ кГц				$f = 1000$ кГц			
	$ \delta $	φ_δ , град.	$\text{Re } \delta$	$\text{Im } \delta$	$ \delta $	φ_δ , град.	$\text{Re } \delta$	$\text{Im } \delta$
0	0,0026	-45,0	0,00182	-0,0018	0,0047	-44,9	0,00334	-0,0033
1	0,0083	-77,3	0,00182	-0,0081	0,0245	-82,1	0,00337	-0,0243
2	0,0145	-82,7	0,00184	-0,0144	0,0455	-85,7	0,00341	-0,0453
3	0,0208	-84,9	0,00184	-0,0207	0,0667	-86,9	0,00360	-0,0665
4	0,0271	-86,0	0,00188	-0,0270	0,0881	-87,5	0,00384	-0,0880
5	0,0334	-86,7	0,00192	-0,0333	0,1100	-87,8	0,00421	-0,1100
7	0,0460	-87,5	0,00200	-0,0459	0,1550	-87,8	0,00593	-0,1540

ет существование поверхностной электромагнитной волны. Данные по относительному затуханию поверхностной волны, полученные в эксперименте, согласуются с результатами численных расчётов электромагнитного поля. Экспериментально показано, что на частотах 10 и 15 МГц поверхностная волна затухает значительно слабее, чем земная.

При расчётах распространения земной волны над морской ледовой поверхностью необходимо знать электрические свойства морской воды (индекс w), льда (индекс i) и толщину льда. Для Белого и Баренцева морей проводимость σ_w изменяется в пределах $2,50 \div 3,33$ См/м, что ниже, чем в средних и южных широтах Тихого, Атлантического и Индийского океанов ($\sigma_w = 4 \div 5$ См/м). Диэлектрическая проницаемость воды ε_w при температуре $1 \div 20$ °С изменяется в пределах $87 \div 80$. Электропроводность льда равна $\sigma_i = 10^{-4} \div 10^{-6}$ См/м. Она зависит от температуры, частоты и наличия примесей. Диэлектрическая проницаемость морского льда ε_i изменяется в пределах $4 \div 9$. Она зависит от плотности, частоты излучения, температуры и давления. Толщина морского льда h_i зависит от его возраста. Для многолетнего пакового льда она составляет $3 \div 5$ м, а для однолетнего льда в районе острова Жохова $1,3 \div 1,7$ м.

Геоэлектрический разрез слоистой среды лёд—море определим как двухслойный. В расчётах, результаты которых приведены в табл. 1 и на рис. 2, примем $\sigma_i = 2 \cdot 10^{-5}$ См/м, $\varepsilon_i = 5$, $\rho_w = 0,3$ Ом · м и $\varepsilon_w = 87$. Толщину льда будем увеличивать от 0 до 7 м. Изменения величин $|\delta|$, φ_δ , $\text{Re } \delta$ и $\text{Im } \delta$ в зависимости от толщины льда на частотах 300 и 1000 кГц представлены в табл. 1. Из неё видно, что с ростом толщины льда $|\delta|$ увеличивается в $3,5 \div 50$ раз, а фаза смещается на $32^\circ \div 43^\circ$ в сторону области, соответствующей сильно индуктивным импедансам (до -88°). Изменение электрических параметров льда в пределах $\sigma_i = (0,1 \div 1) 10^{-4}$ См/м и $\varepsilon_i = 4 \div 9$ слабо влияет на величину δ , тогда как увеличение толщины льда от 1 до 7 м приводит к почти линейному росту величины $|\delta|$ и смещению фазы φ_δ в сильно индуктивную область.

При рассмотрении зависимостей действительной, $\text{Re } \delta$, и мнимой, $\text{Im } \delta$, частей импеданса от толщины льда установлено, что на частотах ниже 1000 кГц при увеличении толщины льда $\text{Re } \delta$ остаётся почти постоянной, а $\text{Im } \delta$ увеличивается линейно. В диапазонах очень низких, низких и средних частот слой льда с толщиной $1 \div 7$ м можно считать тонким [5]. Из-за наличия тонкого плохо проводящего слоя льда на море в импедансе двухслойной среды $\delta = \delta_w - ikh_i$ к импедансу морской воды δ_w добавляется величина $-ikh_i$, линейно зависящая от толщины слоя льда и смещающая фазу импеданса в сильно индуктивную область. При этом электрические свойства слоя льда почти не влияют на изменение импеданса. При прогнозировании распространения радиоволн над ледовыми полями на море необходимо наиболее точно определять толщину слоя льда. Таким образом, частотные зависимости импеданса структуры лёд—море (рис. 2) показывают, что распространение радиоволн над ледовыми полями имеет особенности, характерные для сильно-индуктивных радиотрасс. Поэтому ледовые поля Арктики интересны для практики рас-

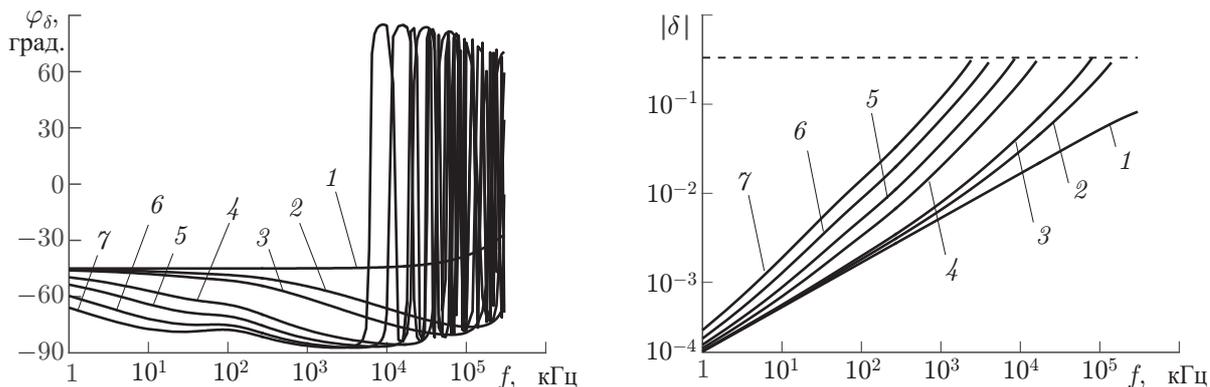


Рис. 2. Частотная зависимость поверхностного импеданса двухслойной среды лёд—морская вода. Цифры на графиках обозначают толщину слоя льда h_i : кривая 1 — $h_i = 0$, 2 — 0,1 м, 3 — 0,2 м, 4 — 1 м, 5 — 2 м, 6 — 4 м, 7 — 7 м

пространства земных радиоволн. В диапазонах очень низких, низких и средних частот покрытые льдом морские акватории почти всегда удовлетворяют импедансным граничным условиям, т. е. выполняется неравенство $|\delta|^2 \ll 1$.

На рис. 3 приведена частотная зависимость толщины льда, характеризующая применимость импедансных граничных условий для двухслойной структуры лёд—море, при её изменении от 0,1 до 7 м и частоте излучения до 150 МГц. Нами принято, что покрытые льдом акватории удовлетворяют импедансным граничным условиям при $|\delta|^2 < 0,1$. Из графика на рис. 3 следует, что появление поверхностной электромагнитной волны над структурой лёд—море зависит от толщины слоя льда. Эта волна появляется в ограниченной сверху полосе частот (область под кривой на рис. 3, где выполняются импедансные граничные условия). Фаза импеданса соответствует под-области с относительно сильной индуктивностью и изменяется от -76° до $-87,3^\circ$. Толщину льда можно связать с сезоном года и типом морского льда. Зависимость $f(h)$ аппроксимируется функцией

$$\lg f [\text{МГц}] = -0,97 \lg h [\text{м}] + 1,23 \quad (2)$$

и может служить аналогом известного для высокочастотного диапазона [9] понятия критической частоты, но для поверхностной волны над структурой лёд—море. На основе зависимости (2) следует выбирать рабочие частоты радиолиний связи на поверхностной электромагнитной волне в разные сезоны года и на разных трассах распространения. Эксперименты [1], выполненные на частотах $10 \div 15$ МГц при толщине льда 1 м, показали наличие этой волны, а на частоте 20 МГц — её отсутствие. Аналогичные зависимости рассчитываются также для любых других двухслойных структур типа диэлектрик—проводник [10].

Рассмотрим в качестве примера расчёты функции ослабления и уровня электрического поля над импедансной структурой лёд—море на частоте 300 кГц и на расстоянии R до 2000 км. Расчёты

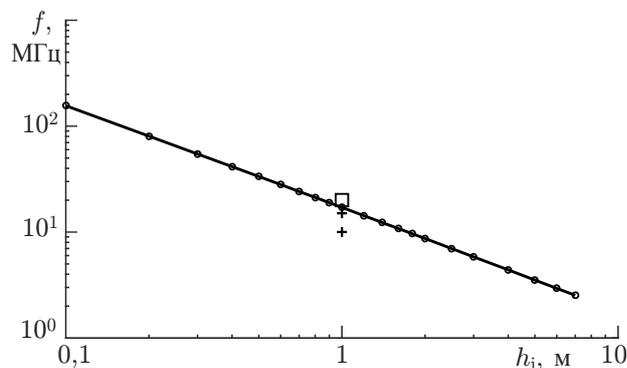


Рис. 3. Частотная зависимость толщины льда для двухслойной структуры лёд—море при её изменении от 0,1 до 7 м и $\rho_i = 50\,000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\varepsilon_i = 5$, $\rho_w = 0,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\varepsilon_w = 87$, $h_w = \infty$. Символы + отвечают появлению поверхностной электромагнитной волны в эксперименте, символ □ — её отсутствию

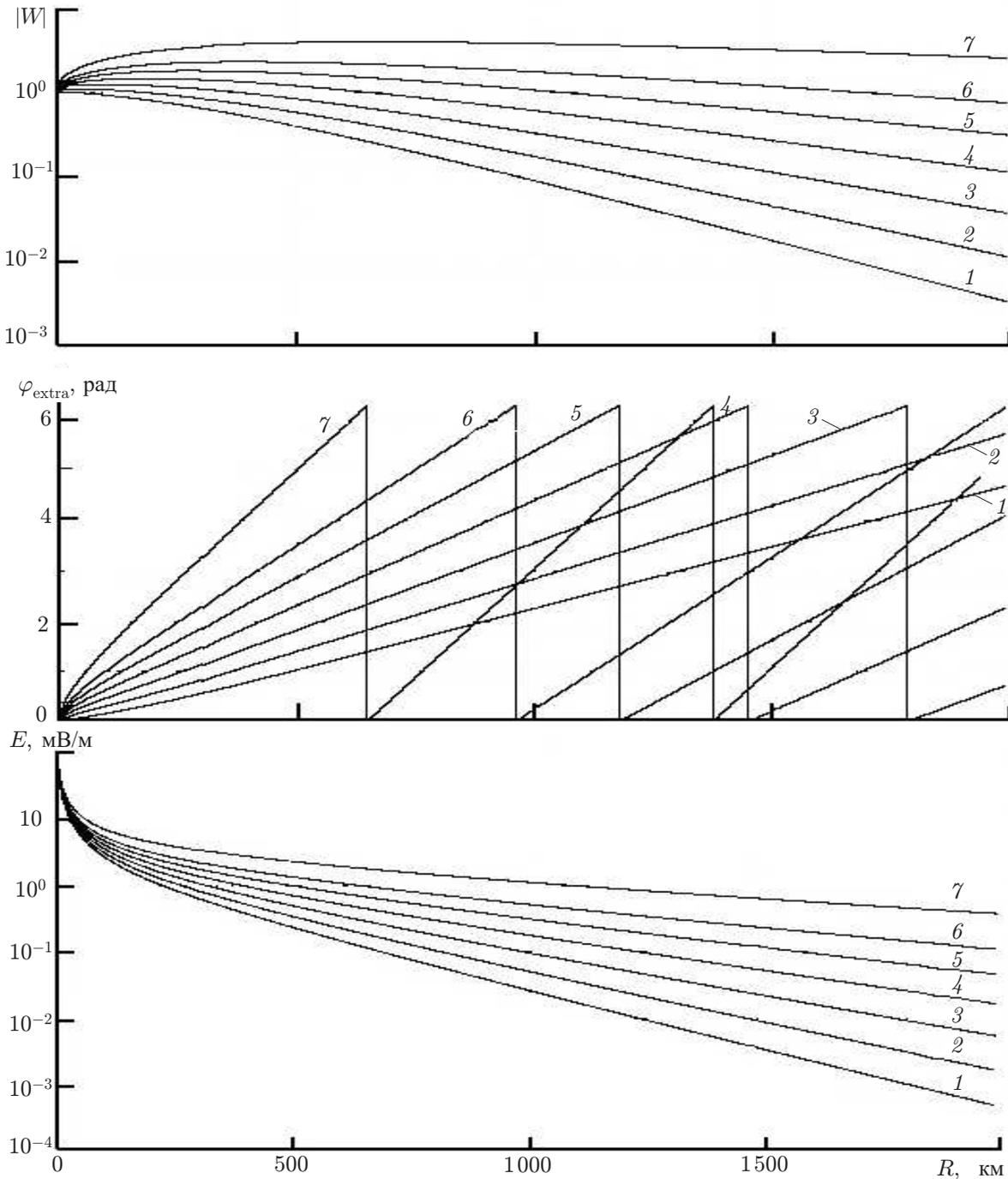


Рис. 4. Результаты расчётов $|W|$, φ_{extra} и уровня поля E земной волны над однородной в продольном направлении структурой лёд–море для разных толщин слоя льда h_i : $h_i = 0$ – кривая 1, 1 м – 2, 2 м – 3, 3 м – 4, 4 м – 5, 5 м – 6, 7 м – 7

функции ослабления W с учётом сферичности Земли проведены по ряду В. А. Фока [5]:

$$W(x, y, q) = \sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\exp(ixt_s)w(t_s - y)}{(t_s - q^2)w(t_s)},$$

где

$$x = \frac{R}{a} \left(\frac{ka}{2} \right)^{1/3}, \quad y = \left(\frac{2}{ka} \right)^{1/3} kh_0, \quad q = i\delta \left(\frac{ka}{2} \right)^{1/3},$$

a — радиус Земли, δ — приведённый поверхностный импеданс подстилающей поверхности ($-\pi/2 < \arg \delta < \pi/2$), h_0 — высота приёма сигнала над поверхностью Земли. Параметры t_s являются корнями трансцендентного уравнения

$$w'(t) - qw(t) = 0,$$

где $w(t)$ и $w'(t)$ — функция Эйри, определяемая уравнением $w''(t) - tw(t) = 0$, и её производная соответственно [5]. На начальном участке радиотрассы, где сферичностью Земли можно пренебречь, функция ослабления рассчитывается по формуле Зоммерфельда с помощью рядов (1) в предположении, что в окрестности излучателя справедлива модель однородной по импедансу плоской поверхности. На рис. 4 приведены результаты расчётов величины $|W|$, дополнительной фазы φ_{extra} и поля E на частоте 300 кГц для однородной в продольном направлении подстилающей структуры как функции толщины льда. При этом вертикальная составляющая напряжённости электрического поля E_v на расстоянии R на сферической поверхности Земли представляется в виде $E_v = WE_0$, где E_0 — напряжённость электрического поля вертикального диполя, расположенного на плоской бесконечно проводящей поверхности. Мощность излучения полагалась равной 1 кВт. Сравнение графиков на рис. 4 свидетельствует о том, что условия распространения электромагнитных волн над ледовыми полями из-за появления поверхностной электромагнитной волны благоприятнее, чем над морской водой.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна и практическая значимость работы состоит в том, что в ней предложен и теоретически и экспериментально обоснован частотный критерий появления поверхностной электромагнитной волны над слоистой структурой лёд—солёная вода. Он необходим для выбора рабочей частоты высокоширотных радиолиний связи на этой волне в разные сезоны года и на разных трассах распространения радиоволн [11].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект 14-19-01079) в Институте физического материаловедения СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 3. С. 88.
2. Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г., Хаптанов В. Б. и др. // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. 2014. № 4 (16). С. 166.
3. Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г. и др. // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. 2014. № 4 (16). С. 151.
4. Wait J. R. Electromagnetic waves in stratified media. New York: Pergamon Press, 1962. 372 p.
5. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991. 196 с.
6. Башкуев Ю. Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207 с.

7. Св-во № 2002610893 РФ. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Л. Х. Ангархаева; заявитель и правообладатель Бурятский научный центр СО РАН. № 2002610567; заявл. 11.04.2002; зарегистр. 06.06.2002. 1 с.
8. Мельчинов В. П., Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х. и др. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 258 с.
9. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972. 464 с.
10. Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х., Дембелов М. Г. и др. // Труды 24-й Международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014), Севастополь, 7–13 сентября 2014. Т. 2. С. 1223.
11. Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., Ангархаева Л. Х. и др. // Тр. VIII Всероссийской научно-техн. конф. «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 24–26 ноября 2014. С. 200.

Поступила в редакцию 14 апреля 2015 г.; принята в печать 6 октября 2015 г.

**FREQUENCY DOMAIN CRITERION OF APPEARANCE
OF AN ELECTROMAGNETIC SURFACE WAVE
ABOVE THE LAYERED ICE—SALT WATER STRUCTURE**

*Yu. B. Bashkuyev, L. Kh. Angarkhaeva, I. B. Naguslayeva, V. B. Khaptanov,
M. G. Dembelov, and D. G. Buyanova*

We propose a frequency domain criterion for appearance of an electromagnetic surface wave above the layered ice—salt water structure and substantiate it theoretically and experimentally. It is found that an ice layer on the ocean surface increases the surface impedance module and shifts its phase to the domain corresponding to strongly inductive impedances (with a phase of up to -88°). We show that due to the presence of a thin low-conductivity ice layer on the ocean surface, an additive component appears in the ocean water impedance, which depends on the thickness of the ice layer linearly and shifts the impedance phase to the region corresponding to strong inductance. In this case, electric properties of the ice layer have almost no influence on the change in the impedance. The ice layer has a great influence on the electromagnetic field, which can be greater over the ice-covered ocean compared with the field over an infinitely conducting plane. The field increase effect is due to the electromagnetic surface wave.