

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.37

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СТРУКТУРЫ “ТОЛСТЫЙ” ЛЕД–МОРЕ” В ДИАПАЗОНЕ ОТ СВЕРХДЛИННЫХ ДО УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН

© 2021 г. Ю. Б. Башкуев^а, *, Л. Х. Ангархаева^а, Д. Г. Буянова^а, В. П. Мельчинов^б^аИнститут физического материаловедения СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Российская Федерация^бСеверо-Восточный федеральный университет,
ул. Кулаковского, 48, Якутск, 677000 Российская Федерация

*E-mail: buddich@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принята к публикации 17.04.2021 г.

Для расчетов электромагнитного поля над двухслойной структурой “толстый” лед–море” определены области применимости импедансных граничных условий для вертикально-поляризованной волны в диапазоне 0.01...120 МГц. Рассмотрены семь моделей ледяного покрова, толщина которого изменялась от 2 до 9 м. Результаты необходимы для расчетов функции ослабления W и уровня поля E на длинных, средних и коротких диапазонах радиоволн на трассах Северного морского пути.

DOI: 10.31857/S0033849421100041

ВВЕДЕНИЕ

Основы теории распространения электромагнитных волн над слоистыми импедансными средами развиты в работах [1–4]. Классиками радиопроизики [1–4] разработана теория физического эффекта появления поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) в импедансной постановке задачи. Из теории, развитой в работах Г.И. Макарова, В.В. Новикова и Дж.Р. Уэйта, следует, что ПЭВ распространяется только над радиотрассами с сильно индуктивным поверхностным импедансом, например “лед–море”. Это основная особенность ПЭВ, которая выделяет ПЭВ среди других типов радиоволн, распространяющихся вдоль границы “воздух–подстилающая импедансная среда”. Из-за диффузии вдоль волнового фронта электромагнитная волна как бы “подтекает” к границе раздела этих сред и распространяется с меньшим затуханием, чем обычная “земная” (объемная) волна. В условиях покрытого льдом моря ПЭВ может распространяться вдоль такой слоистой структуры “лед–море” на значительные расстояния. Учет ПЭВ, важного физического механизма на радиотрассах “лед–море”, необходим для расчетов пространственно-энергетических характеристик арктических радиоканалов. Методика расчета функции ослабления W и уровня поля E над импедансными трассами подробно описана в работе [5]. Она основана на следующих методах расчета функции ослабления W поля земной волны: 1) ряд нормальных волн (ряд В.А. Фока) [2, 6]; 2) формула

Калинина–Фейнберга [7]; 3) интегральное уравнение Хаффорда [8]; 4) интегральное уравнение Фейнберга [7]. При расчетах подстилающая среда должна удовлетворять импедансным граничным условиям Шукина–Леонтовича, т.е. должно выполняться условие $|\delta|^2 \ll 1$ (δ – приведенный поверхностный импеданс радиотрассы).

Цель статьи – определить особенности частотной зависимости приведенного поверхностного импеданса δ для структуры “толстый лед”–море” в диапазоне 0.01...120 МГц. При расчетах толщина льда изменялась от 2 до 9 м, рассмотрены семь различных моделей ледяной структуры, которые учитывают соленость льда. Результаты моделирования необходимы для оценки условий распространения длинных, средних и коротких радиоволн (ДВ–СВ–КВ) на трассах Северного морского пути (СМП).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим поле вертикального электрического излучателя над плоской поверхностью. Модуль вертикальной составляющей $|E_i|$ электрического поля связан с модулем функции ослабления $|W|$ формулой:

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

где P – излучаемая мощность, кВт; R – расстояние от источника поля до точки приема вдоль

земной поверхности, км; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны), $1/ikR$ и $1/(ikR)^2$ — соответственно индукционный и статический члены, которые участвуют в формировании поля в ближней зоне излучателя; $W(SR)$ — функция ослабления поля относительно бесконечно проводящей плоскости; SR — численное расстояние, $S = ik\delta^2/2$ (δ — импеданс радиотрассы ($-\pi/2 < \varphi_\delta < \pi/2$)). Зависимость поля от времени принята в виде функции $\exp(-i\omega t)$.

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

При больших значениях $|SR|$, учитывая разложение интеграла вероятности от комплексного аргумента

$$\int_{\sqrt{SR}}^{+\infty} \exp(z^2) dz,$$

получаем

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

Выражение функции ослабления над сильно индуктивной трассой, когда $\text{Im } \sqrt{S} \leq 0$, содержит член $W_{\text{пов}} = 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR)$, соответствующий поверхностной волне. Максимум поверхностной волны, равный

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

наблюдается на расстоянии

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

На расстояниях $R \gg R_{\text{макс}}$ поверхностная волна экспоненциально затухает, и имеет место единая асимптотическая формула

$$W(SR) = -\frac{1}{2SR}.$$

Расчет функции ослабления поля земной волны над гладкой сильно-индуктивной поверхностью с учетом сферичности проводится с помощью известного ряда Фока [6]:

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

Здесь $x = \frac{R}{a} \left(\frac{ka}{2}\right)^{1/3}$, $y = \left(\frac{2}{ka}\right)^{1/3} kh$, $q = i\delta \left(\frac{ka}{2}\right)^{1/3}$, где a — радиус Земли; R — расстояние от источника до точки приема, отсчитываемое вдоль сферической поверхности Земли; h — высота приема сигнала над поверхностью Земли. Параметры t_s являются корнями (нулями) трансцендентного уравнения $w'(t) - qw(t) = 0$.

В работе [5] рассмотрены условия распространения радиоволн над структурой “лед–море” в широком диапазоне частот при толщине льда до 2.7 м. Анализ расчетных данных по распростране-

нию ДВ-СВ-КВ-радиоволн показал, что необходимо провести численное моделирование модуля и фазы импеданса δ для модели “толстый лед”–море” в диапазоне частот от 10 кГц до 120 МГц. Задача для “толстого” льда возникла также при создании карт импеданса для центральной части Северного Ледовитого океана (СЛО) [9] с использованием данных по толщине льда h_i из карт ледовой обстановки для СЛО для разных сезонов года, представленных на сайте Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (<http://www.aari.ru/projects/ecimo/index.php>). Отметим, что только при попадании фазы импеданса в сильно индуктивную область импедансов ($-\pi/2 < \varphi_\delta < -\pi/4$) на арктической радиотрассе может появиться ПЭВ.

2. ПРИВЕДЕННЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СЛОИСТОЙ СРЕДЫ. МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ “ТОЛСТЫЙ” ЛЕД–МОРЕ”

Приведенный поверхностный импеданс δ подстилающей среды определяется как отношение тангенциальных составляющих электрического E_τ и магнитного H_τ полей на границе раздела “воздух–подстилающая среда”:

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

где $Z_0 = 120\pi$ — характеристический импеданс свободного пространства [1–3]. Поверхностный импеданс $Z_s = E_\tau / H_\tau$ имеет размерность Ом, при нормировке на характеристический импеданс вакуума $Z_0 = 120\pi$ (Ом) получаем безразмерную величину, которую принято в радиофизике называть приведенным поверхностным импедансом δ . Частотная зависимость приведенного поверхност-

ного импеданса двухслойной среды “лед–море” рассчитана по формуле [10]

$$\delta = \delta_1 \frac{1 - R_{12} \exp(-i2k_0 \sqrt{\epsilon_{1k} - \sin^2 \theta} h_1)}{1 + R_{12} \exp(-i2k_0 \sqrt{\epsilon_{1k} - \sin^2 \theta} h_1)}, \quad (1)$$

где $R_{12} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2}$ – коэффициент отражения на границе между слоями; δ_1, δ_2 – импедансы слоев; h_1 – толщина верхнего слоя; $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\epsilon_{jk} = \epsilon_j + i60\lambda\sigma_j$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость слоя (λ – длина волны; ϵ_j – диэлектрическая проницаемость j -го слоя; σ_j – электропроводность j -го слоя); θ – угол падения плоской вертикально поляризованной волны на границу раздела “воздух–подстилающая среда”. При расчетах принято, что монохроматическая волна имеет зависимость от времени $\exp(-i\omega t)$. Приведенный поверхностный импеданс слоистой среды δ (далее – импеданс) зависит от электрических параметров слоев σ_j, ϵ_j , толщины слоев h_j , частоты поля ω и угла падения волны θ . Анализ расчетов поверхностного импеданса показал, что при малых значениях $|\epsilon_{1k}|$ верхнего слоя в случае произвольного угла падения θ необходимо использовать формулу для импеданса первого слоя:

$$\delta_1 = \sqrt{\epsilon_{1k} - \sin^2 \theta} / \epsilon_{1k}. \quad (2)$$

Расчеты импеданса для “толстого” морского льда (от 2 до 9 м) в диапазоне радиоволн от километровых до метровых показали ряд интересных свойств таких импедансных структур.

Рассмотрим семь различных моделей морского льда, которые учитывают слой снега и изменение электропроводности льда (диэлектрическая проницаемость льда для всех моделей равна $\epsilon_l = 4$).

1. В качестве “базовой” модели для расчетов примем двухслойную модельную среду “лед–море” с типичными параметрами для льда: $\sigma_l = 10^{-4}$ См/м, $\epsilon_l = 4$. Для морской воды примем $\epsilon_v = 87$, $\sigma_v = 3$ См/м.

2. Для модели “снег–лед–море” примем толщину снега 0.3 м, $\sigma_c = 10^{-5}$ См/м; $\epsilon_c = 1.5$. Параметры льда и его толщину не меняем.

3. Для модели “составной” лед–море” принимаем электропроводность верхнего слоя льда $\sigma_{l1} = 10^{-4}$ См/м и его толщину $h_{l1} = 0.5$ м; для среднего слоя $\sigma_{l2} = 10^{-3}$ См/м и толщину $h_{l2} = 1$ м; для нижнего слоя $\sigma_{l3} = 10^{-2}$ См/м и толщину $h_{l3} = 0.5$ м.

4. Модель ““соленый” лед–море” с электропроводностью слоя льда: $\sigma_l = 10^{-3}$ См/м при его толщине $h_l = 2$ м.

5. Модель ““соленый” лед–море” с электропроводностью слоя льда $\sigma_l = 10^{-2}$ См/м, толщина льда $h_l = 2$ м.

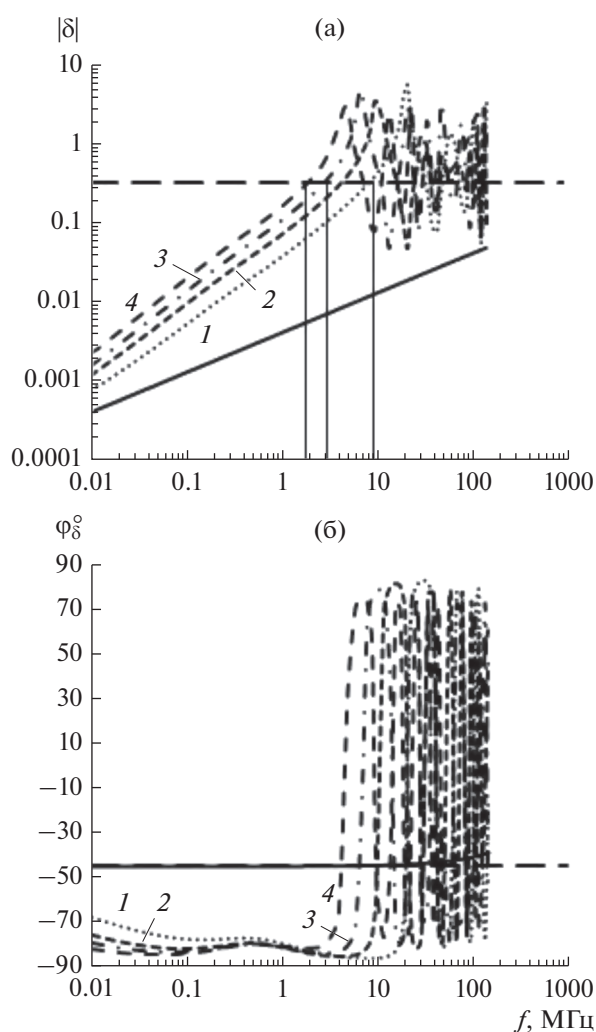


Рис. 1. Частотные зависимости модуля (а) и фазы (б) приведенного поверхностного импеданса для двухслойного геоэлектрического разреза (ГЭР) “толстый” лед–море” с толщиной льда: 2 (1), 4 (2), 6 (3) и 9 м (4).

6. Модель ““градиентный” лед–море” с линейной зависимостью изменения электропроводности льда: $\sigma(z) = \sigma_0(1 + \alpha z)$. Электропроводность на верхней границе σ_0 равна $\sigma_l = 10^{-4}$ См/м, а на нижней границе равна электропроводности моря $\sigma_v = 3$ См/м.

7. Модель ““градиентный” лед–море” с экспоненциальной зависимостью изменения электропроводности льда: $\sigma(z) = \sigma_0 \exp(\beta z)$. Значения электропроводности на верхней и нижней границах такие же, как в модели 6.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1–4 представлены частотные зависимости модуля и фазы импеданса δ для разных моделей морского льда. На всех рисунках модуль и фаза импеданса чистого моря обозначены сплош-

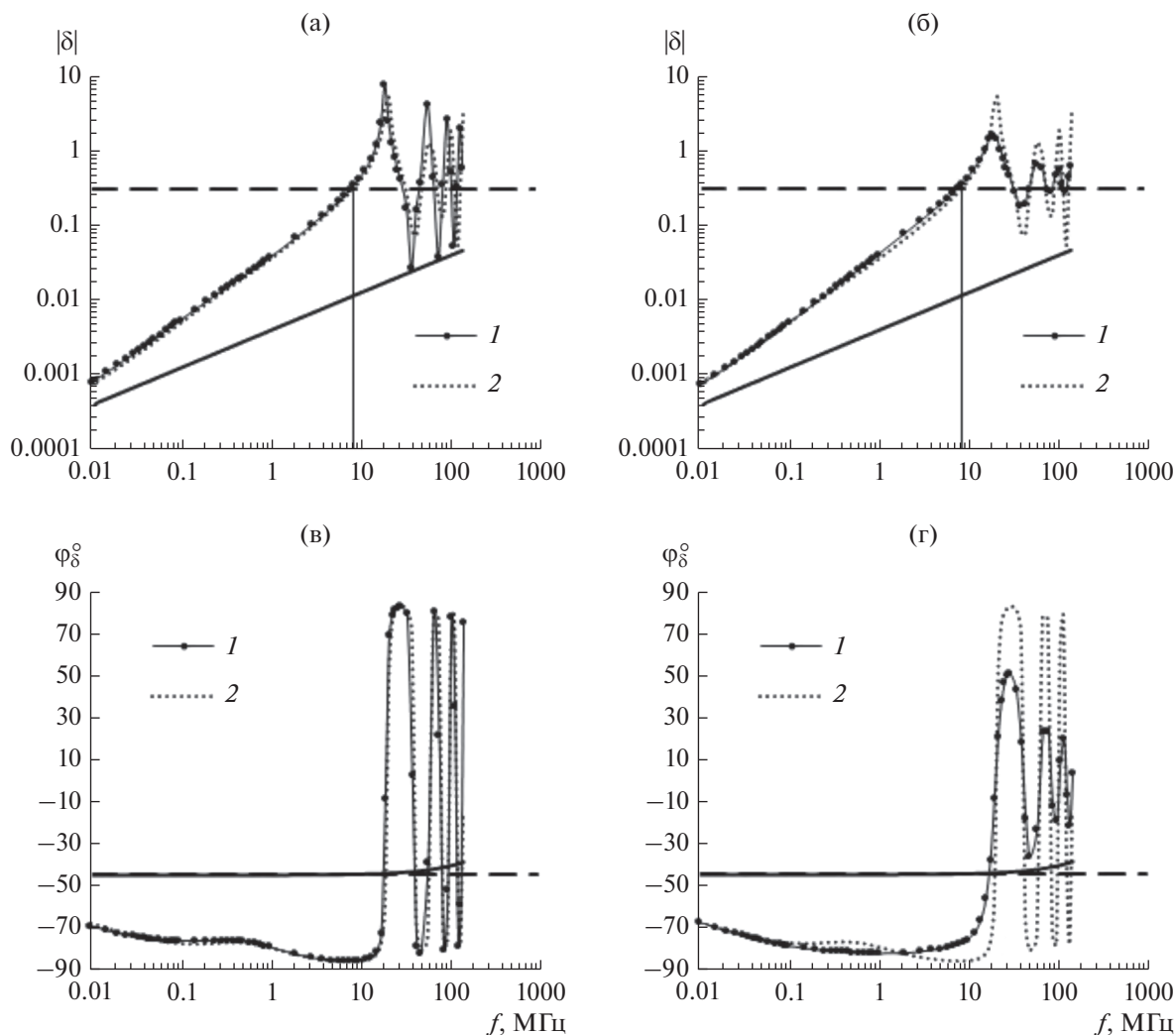


Рис. 2. Частотные зависимости модуля (а, б) и фазы (в, г) приведенного поверхностного импеданса: кривые 1 – для трехслойного ГЭР “снег–лед–морь” с толщиной снега 0.3 м и льда 2 м (а, в) и для четырехслойного ГЭР “составной” лед–морь” с суммарной толщиной льда 2 м (б, г); кривые 2 – “базовая” модель “лед–морь” (а–г).

ной линией. На рис. 1а, 2а, 2б, 3а, 4а и 4б горизонтальной штриховой линией ($|\delta| = 0.316$) обозначена граница применимости импедансных граничных условий, а на рис. 1б, 2в, 2г, 3б, 4в и 4г такая же линия соответствует фазе импеданса $\varphi_\delta = -45^\circ$.

На рис. 1 представлены частотные зависимости импеданса δ “базовой” модели для толщины льда 2, 4, 6 и 9 м. Для льда толщиной от 2 до 9 м фаза импеданса попадает в сильно индуктивную область ($\varphi_\delta = -67^\circ \dots -86^\circ$) в полосе частот от 0.01 и до 2...8 МГц. Чем толще лед, тем ниже верхняя граница попадания фазы импеданса в сильно индуктивную область. Выделим два частотных критерия возможного появления ПЭВ: 1) фаза импеданса попадает в сильно индуктивную область; 2) модуль импеданса удовлетворяет применимости импедансных граничных условий $|\delta| < 0.316$. Появление ПЭВ возможно до частоты 8 МГц.

Анализ зависимости импеданса δ от толщины льда показал, что для “толстого” льда модуль импеданса почти линейно зависит от толщины льда для всех рассмотренных моделей среды. Для толщины льда 2 м и наличия слоя снега толщиной 0.3 м и моделей “составной” лед, “солёный” лед (изменение электропроводности слоя льда на 1 и 2 порядка в сторону ее увеличения) дают очень близкие частотные зависимости модуля импеданса. Границу области попадания фазы импеданса в сильно индуктивную область определим как $\varphi_\delta^\circ = -46^\circ$. По этому критерию различаются, и довольно существенно, фазовые характеристики импеданса только для модели “солёный” лед при $\sigma_j = 10^{-2}$ См/м. Для этой модели существенно изменяется верхняя граница сильно индуктивной области, она находится около частоты 2 МГц. В целом расчеты показывают, что область появле-

ния ПЭВ для “толстого” льда смещается в сторону более низких частот. Для расчетов электромагнитного поля прежде всего следует сравнить значения модулей импедансов структуры “лед–море” с импедансом чистого моря. Рассмотрим представленные на рис. 1–4 расчетные значения модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ° импеданса в диапазоне 0.01...9 МГц при толщине льда 2 м. Из расчетных данных следует, что практически для всех этих моделей фаза импеданса φ_δ° на рассмотренных частотах попадает в сильно индуктивную область (менее -45°), т.е. по эффективным электрическим параметрам трасса распространения соответствует слоистой среде “диэлектрик на проводнике”. Значения модуля импеданса для рассмотренных моделей среды на всех частотах от 10 кГц и до 8...9 МГц близки между собой. Они существенно больше (до 10...20 и более раз) модуля импеданса для чистого моря.

Сравнение модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ° импеданса на частоте 300 кГц для трех моделей среды (лед–море; градиентный лед (линейное изменение)–море; градиентный лед (экспонента)–море) в зависимости от толщины льда (2...9 м) показало, что фаза импеданса φ_δ° для всех моделей и толщин льда попадает в сильно индуктивную область, от -77° до -83.8° , а модуль импеданса $|\delta|$ не превышает 0.0569, т.е. полностью выполняются импедансные граничные условия Шукина–Леонтовича.

При значениях модуля импеданса, удовлетворяющего импедансным граничным условиям, и сильно-индуктивных фазах импеданса следует ожидать появления ПЭВ [1–3, 5]. Уровень ПЭВ будет зависеть от толщины льда и находиться в полосе частот 0.3...9 МГц [11, 12]. Учет зависимости поверхностного импеданса от толщины слоя льда важен для систем радионавигации и связи в ДВ-СВ-диапазонах радиоволн [13–15]. Следовательно, при расчетах распространения импульсных ДВ-СВ-КВ-радиосигналов в импедансном канале “Земля–ионосфера” необходимо учитывать и дисперсионные свойства нижней стенки волновода – ледяной поверхности на море. Для таких структур проведены сравнительные расчеты условий распространения ДВ-СВ-радиоволн [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Классиками радиофизики [1–4] разработана теория физического эффекта появления ПЭВ на радиотрассах “лед–море” в импедансной постановке задачи для многослойной среды. Необходимо особо отметить физическую роль понятия поверхностного импеданса для решения различных прикладных задач в области радиосвязи, навигации, радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Учет поверхностного импеданса, его модуля и фазы, важен в задачах длинноволновой и

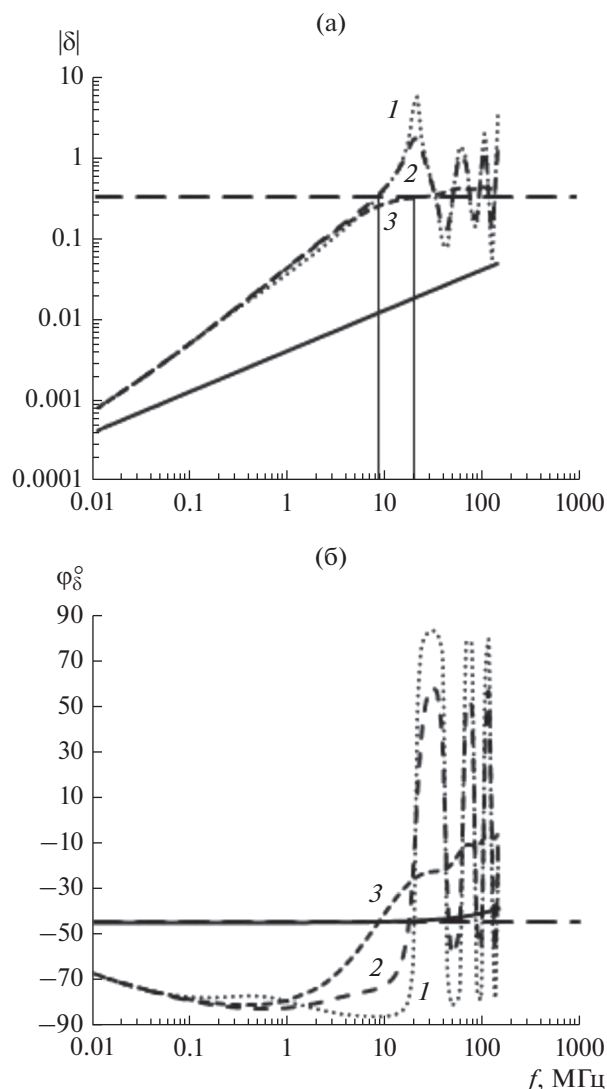


Рис. 3. Частотные зависимости модуля (а) и фазы (б) приведенного поверхностного импеданса двухслойного ГЭР “соленый” лед–море” с толщиной льда 2 м и различной проводимостью льда: 10^{-3} (1) и 10^{-2} (2) См/м; кривая 3 – “базовая” модель “лед–море”.

средневолновой импульсно-фазовой радионавигации, например, таких как системы “Лоран-С” или “Чайка” [16], а также при приеме радиоволн под водой и льдом. Исследование условий распространения радиоволн над слоистой импедансной средой “лед–море” является новым направлением ярко выраженного прикладного назначения. Оно имеет и большое фундаментальное значение, связанное с поиском новых физических принципов для создания современных радиосистем, работающих в Арктике. Разработка моделей структуры “лед–море” для расчетов радиолиний в широком диапазоне длин волн является сложной задачей из-за многообразия геофизических факторов, влияющих на поведение подстилающей среды.

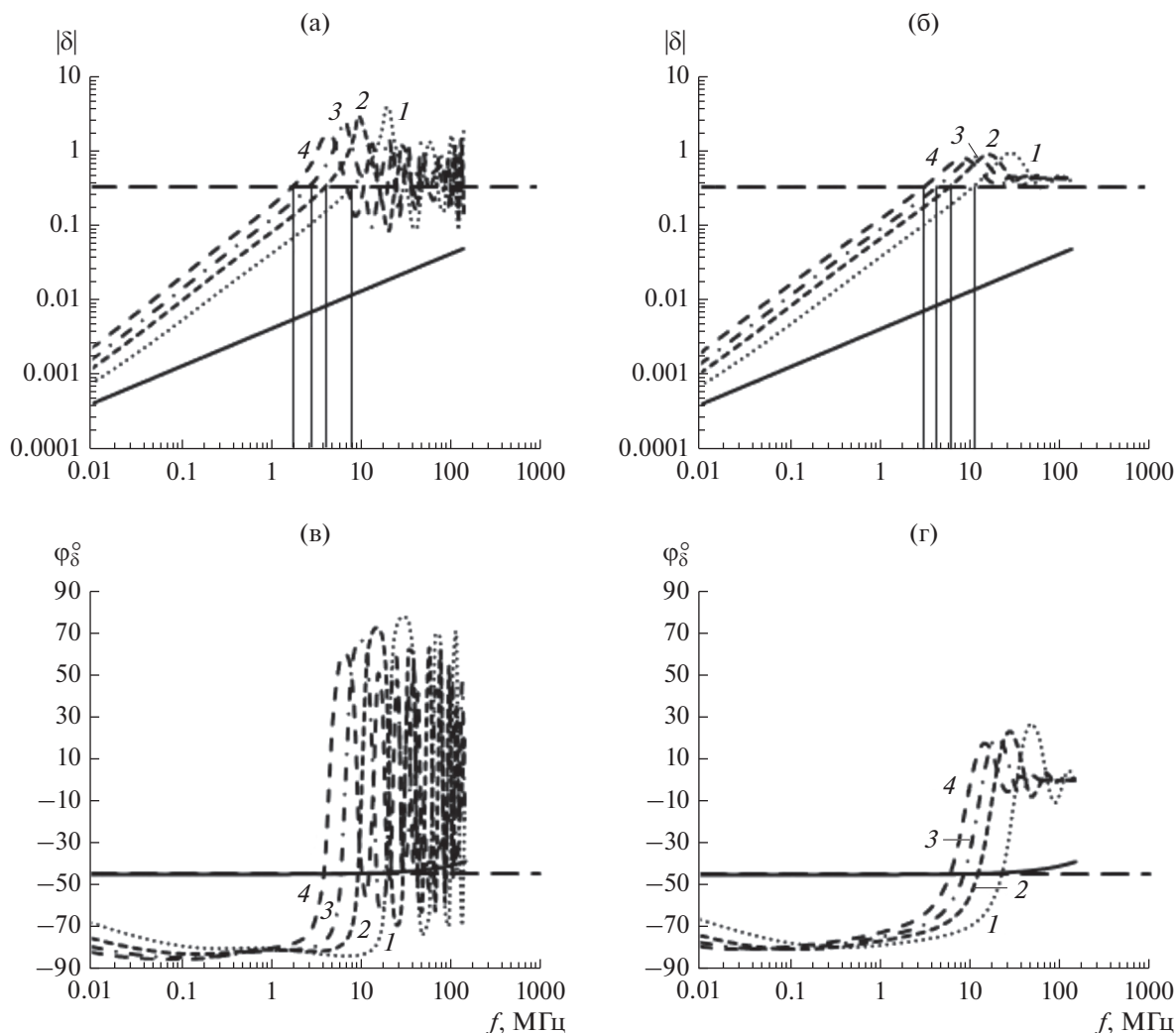


Рис. 4. Частотные зависимости модуля (а, в) и фазы (б, г) приведенного поверхностного импеданса для ГЭР: “градиентный” лед (экспонента)—море” (а, в) и “градиентный” лед (линейный)—море” (б, г); толщина льда 2 (1), 4 (2), 6 (3) и 9 (4) м.

Основная трудность при разработке численных моделей — отсутствие в достаточном объеме экспериментальных данных. Необходимо отметить, что сильно индуктивный импеданс может возникать только на неоднородных по глубине подстилающих структурах. В классической задаче Зоммерфельда такие эффекты отсутствуют.

На Северном морском пути протяженностью 5600 км наиболее сложные ледовые условия встречаются в восточной части — море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Толщина льда достигает 3...6 м и иногда доходит до 8–9 м. Возникают серьезные трудности при проводке караванов судов даже мощными современными ледоколами. В этих же районах работает сеть контрольно-корректирующих станций системы ГЛОНАСС [13]. Проливы СМП, через которые проходят караваны судов, имеют небольшие глу-

бины, иногда не превышающие 10 м. Современные суда с осадкой до 12...15 м не могут проходить через эти проливы. Поэтому трассы проводки таких судов должны быть проложены севернее нынешней трассы СМП. Эти районы Северного Ледовитого океана имеют более толстые льды [14]. Для расчетов электромагнитного поля над двухслойной структурой “толстый” лед—море” определены области применимости импедансных граничных условий для семи моделей ледяной среды в зависимости от толщины льда. По частотным зависимостям импеданса в полосе 0.01...120 МГц для ледяного покрова с малыми значениями относительной комплексной диэлектрической проницаемости определены частотные области сильно индуктивного импеданса в СДВ-ДВ-СВ-КВ-диапазонах, а также частотные полосы появления поверхностной электромагнитной волны. Ре-

зультаты необходимы для расчетов радиолиний на трассах Северного морского пути.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wait J.R.* Electromagnetic Waves in Stratified Media. N.Y: Pergamon Press, 1962.
2. *Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т.* Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991.
3. *Макаров Г.И., Новиков В.В.* // РЭ. 2000. Т. 45. № 9. С. 1029.
4. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
5. *Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г.* // Техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 89.
6. *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1970.
7. *Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Физматлит, 1999.
8. *Hufford G.A.* // Quarterly Appl. Mathem. 1952. V. 9. P. 391.
9. *Bashkuev Yu.B., Naguslaeva I.B., Buyanova D.G., Auyrov D.B.* // Proc. SPIE 10833, 24rd Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. V. 10833. 1083381 (13 December 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2504432>.
10. *Ангархаева Л.Х.* Пакет программ “Импеданс” для решения задач радиоимпедансного зондирования. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2002610893. Оpubл. 20.06.2002 офиц. бюл. “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем”. № 6.
11. *Башкуев Ю.Б., Нагуслева И.Б., Хатанов В.Б., Дембелов М.Г.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 153.
12. *Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Нагуслева И.Б. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 5. С. 400.
13. *Каретников В.В., Пашенко И.В., Соколов А.И.* // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. Вып. 6. С. 166.
14. *Митник Л.М., Хазанова Е.С.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 100.
15. *Бондаренко В.Н., Кокорин В.И.* Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами. Новосибирск: Наука, 2011.
16. *Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А.* Фазовый метод определения координат. М.: Сов. радио, 1979.