

УДК 621.371

ВЫСОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД ЛЕДОВОЙ МОРСКОЙ ТРАССОЙ НА ЧАСТОТЕ 500 КГЦ

Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов

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

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2016 г., после доработки – 27 декабря 2016 г.

Аннотация. На основе сравнения высотных зависимостей модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E на частоте 500 кГц для радиотрасс «лед-море» и «море» длиной до 1000 км показано, что условия распространения СВ радиоволн над покрытым льдом морем на высотах приема до 3-10 км более благоприятны, чем над открытым морем. При анализе численных результатов для модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E установлено, что условия распространения СВ радиоволн на частоте 500 кГц над ледовыми трассами зависят от высоты приема. Поле, возбуждаемое вертикальным электрическим диполем над слоистой структурой «лед-море», имеющей сильно-индуктивный поверхностный импеданс, существенно превышает поле земной волны над открытым морем. На частоте 500 кГц модуль функции ослабления $|W|$ над ледовой трассой на протяжении 1000 км почти всегда выше $|W|$ над однородной морской поверхностью. Он уменьшается при увеличении высоты приема. Для $|W|$ над морем при увеличении высоты приема происходит его небольшой рост. Поле над ледовой трассой на протяжении 1000 км также всегда выше поля над однородной морской поверхностью. Оно уменьшается при увеличении высоты приема. Этот эффект обусловлен концентрацией поля над сильно-индуктивной поверхностью раздела сред. Для поля над морем при увеличении высоты приема происходит его незначительный рост. Численные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных рабочих частот ДВ-СВ радиолиний большой и средней дальности и оценки эффективности каналов связи и навигации в Северном Ледовитом океане. Отметим, что

электромагнитное поле на частоте 500 кГц существует до больших высот приема, что практически важно при организации радиолиний связи и навигации, например, между дрейфующими полярными станциями и летательными аппаратами (самолетами и вертолетами), а также для трансполярных воздушных трасс. Необходимо продолжить численное моделирование высотной зависимости ДВ-СВ радиополя для разных частот, толщин льда и расстояний до излучателя.

Ключевые слова: электромагнитная волна, структура «лед-море», поверхностный импеданс, функция ослабления, уровень поля, морской лед, импедансная трасса

Abstract. It is shown that conditions of propagation of surface electromagnetic waves (SEW) over the ice-covered sea at receiving altitudes up to 10 km are always more favorable than over the open sea. This fact is based on the comparison of height dependencies of the module of an attenuation function $|W|$ and the intensity of the field E at a frequency of 500 kHz for "ice-sea" and "sea" radio paths with a length of up to 1000 km. The analysis of numerical results for the module of an attenuation function $|W|$ and the intensity of the field E showed that conditions of propagation of SEW over the ice paths depend on the height of the reception. The SEW field excited by a vertical electric dipole over a layered structure of the "ice-sea" that has a highly inductive surface impedance is significantly higher than the waves over the open sea. At a frequency of 500 kHz the module of an attenuation function $|W|$ over the ice path distance of 1000 km almost always exceeds $|W|$ over a homogeneous sea surface. It decreases with increasing height of receiving. For $|W|$ over the sea by increasing the height of the reception is increased. The intensity field over the ice path at over 1000 km is always higher than intensity field over homogeneous sea surface. It decreases with increasing height of receiving. This effect is due to "adhesion" of the SEW to highly-inductive interface of mediums. Field intensity increases slightly above the sea by increasing the height of the reception. The numerical results can be used to select the optimal operating frequency of LF-MF radio lines of long and medium range and to estimate the effectiveness of channels of communication and navigation

in the Arctic ocean. Note, that the SEW at a frequency of 500 kHz exists to greater heights of reception. It is practically important in the organization of radio communication and navigation, for example, between the drifting polar stations and aircrafts (planes and helicopters), as well as for Transpolar air routes. It is necessary to continue the numerical modeling of the height dependence of SEW for different frequencies, thicknesses of ice and the distance to the transmitter. Further research must also be associated with the extension of the frequency range of modeling in the microwave range.

Keywords: surface electromagnetic waves (SEW), «ice-sea» structure, surface impedance, an attenuation function, field intensity, sea ice, impedance path

Введение

В работе [1] рассмотрены результаты моделирования распространения радиоволн в диапазоне 100 кГц - 5 МГц над покрытым льдом морем. При этом источник поля и приемник находились на границе раздела. В [1] показано, что условия распространения ДВ-СВ радиоволн над структурой «лед-море» при сильно-индуктивном поверхностном импедансе более благоприятны, чем над чистым морем без льда из-за появления поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ). Установлено, что в диапазоне 100 кГц - 5 МГц на трассах с толщиной льда от 0,6 до 2,7 метра условия распространения радиоволн над ледовыми трассами зависят от частоты, толщины льда и расстояния от излучателя. Получены значения модуля функции ослабления $|W|$, превышающие единицу и достигающие $|W|=4$, которые обусловлены ПЭВ. Дополняющие расчетные и экспериментальные результаты содержатся в работах [2-6].

Цель статьи – на основе численного моделирования провести сравнительный анализ высотной зависимости электромагнитного поля над импедансной радиотрассой на частоте 500 кГц до расстояния 1000 км. Рассматриваются два случая, когда источник поля (передатчик) находится на поверхности, а приемник находится на некоторой высоте над ледовой

поверхностью или открытым морем. Исследование высотной зависимости радиополя на частоте 500 кГц (функция ослабления W и уровень электромагнитного поля E) над слоистой структурой «лед–море» проведено путем численного моделирования с использованием метода расчетов по ряду В.А. Фока [7-9]. Новизна подхода заключается в сравнительном анализе результатов модельных расчетов электромагнитного поля, когда приемник находится на некоторой высоте над ледовой поверхностью или открытым морем. Неоднородность электрических параметров слоистой структуры «лед–море» по глубине учитывается с помощью понятия поверхностного импеданса δ подстилающей среды.

Метод расчета поля над импедансной трассой

В задаче о поле вертикального электрического диполя над сферической поверхностью Земли однокомпонентный вектор Герца Π удовлетворяет импедансному граничному условию [9]:

$$\left. \frac{\partial \Pi}{\partial n} \right|_{z=0} = -ik\delta \Pi, \quad (1)$$

где δ – приведенный поверхностный импеданс однородной радиотрассы, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства, λ – длина волны, n – внешняя по отношению к Земле нормаль, z – вертикальная координата. Область, существенная для распространения радиоволны, охватывает несколько первых зон Френеля в окрестности геодезической линии, соединяющей излучатель и приемник.

Расчет уровня поля E проведен на основе расчета функции ослабления поля W по ряду нормальных волн (ряду В.А. Фока) [7-9]. Программа расчета функции ослабления W поля земной волны над импедансными трассами описана в работах [2-6]. При расчетах принято, что подстилающая среда удовлетворяет импедансным граничным условиям Щукина-Леонтовича, то есть выполняется условие $|\delta|^2 \ll 1$. Запишем функцию ослабления для сферической

ЗЕМЛИ В ВИДЕ:

$$W_0(x, y, q) = \sqrt{\pi x} e^{i\frac{\pi}{4}} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{ixt_s}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y)}{w(t_s)}, \quad (2)$$

здесь $x = \frac{R}{a} \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$, $y = \left(\frac{2}{ka} \right)^{\frac{1}{3}} kh$, $q = i\delta \left(\frac{ka}{2} \right)^{\frac{1}{3}}$; где a – радиус Земли; k – волновое

число свободного пространства; R – расстояние от источника до точки приема, отсчитываемое вдоль земной поверхности; δ – приведенный поверхностный импеданс; h – высота приема сигнала над земной поверхностью. Параметры t_s являются корнями (нулями) трансцендентного уравнения:

$$f(t, q) = w'(t) - qw(t) = 0, \quad (3)$$

где $w(t)$ и $w'(t)$ – функция Эйри, определяемая уравнением $w''(t) - tw(t) = 0$, и ее производная соответственно. Высотную зависимость определяет отношение

$\frac{w(t_s - y)}{w(t_s)}$ в формуле для ряда Фока.

Модуль вертикальной составляющей электрического поля $|E_B|$ связан с модулем функции ослабления $|W|$ формулой:

$$|E_B|_{[MB/M]} = \frac{300\sqrt{P}}{R} \left| W(R) - \frac{1}{ikR} + \frac{1}{(ikR)^2} \right|, \quad (4)$$

где P – излучаемая мощность, кВт; R – расстояние от источника до точки приема, отсчитываемое вдоль поверхности Земли, км; $\frac{1}{ikR}$ – индукционный,

$\frac{1}{(ikR)^2}$ – статический члены, которые «участвуют» в формировании поля в ближней зоне излучателя. Зависимость поля от времени принята в виде функции $\exp(-i\omega t)$. В расчетах излучаемая мощность принята равной 1 кВт.

Расчеты функции ослабления W и напряженности поля E над импедансной радиотрассой проведены для сферической Земли до расстояния 1000 км. Для расчетов принята двухслойная модельная среда «лед-море» с типичными параметрами для морского льда $\sigma_{\text{л}} = 10^{-4}$ См/м, $\epsilon_{\text{л}} = 4$ и толщиной льда $h_{\text{л}} = 2$ м.

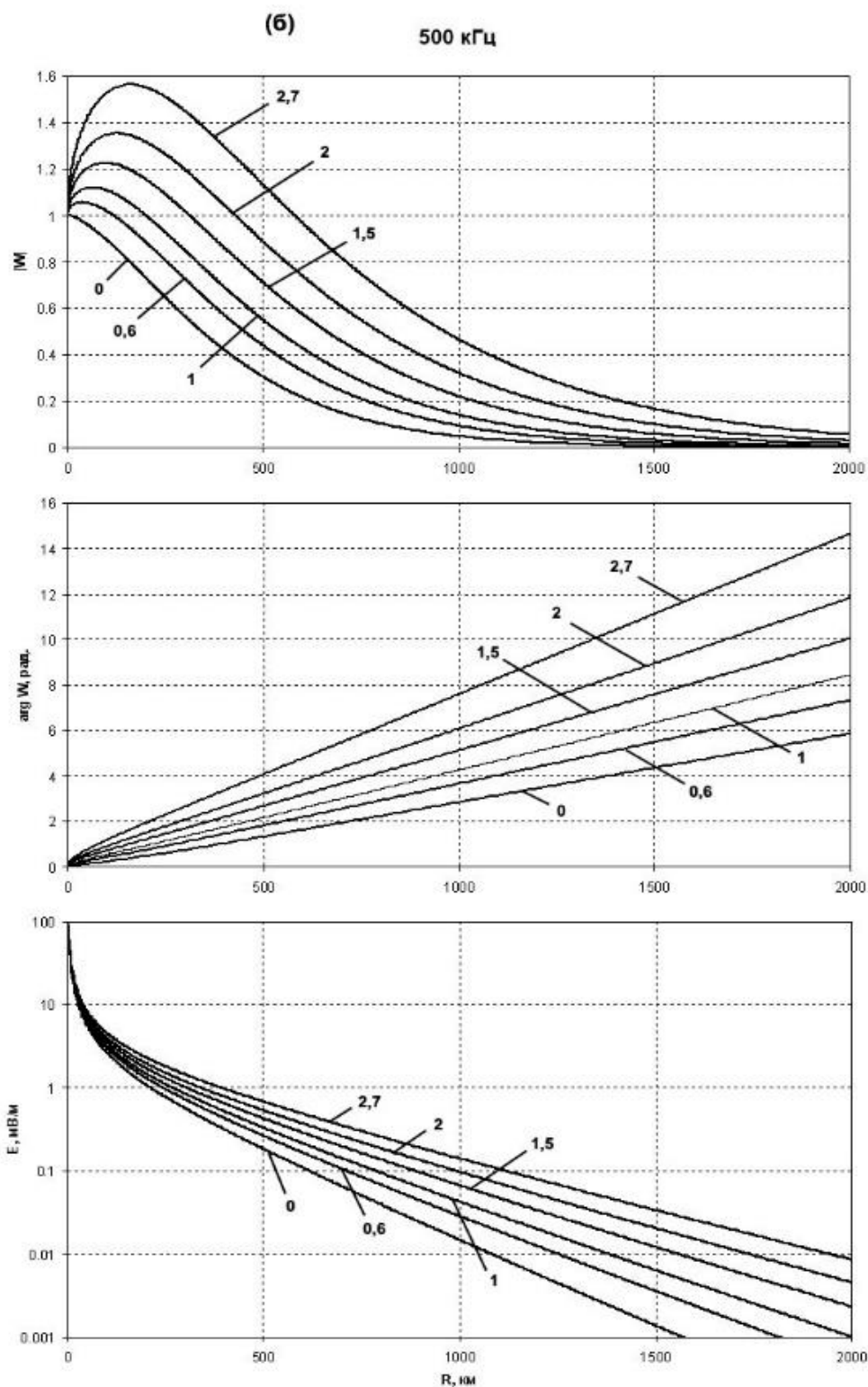


Рис. 1. Графики $|W|$, $\varphi_{\text{доп}}$ и уровня поля E над радиотрассой «лед-море» на частоте 500 кГц на расстоянии от излучателя до 2000 км. (числа на графиках – толщина слоя льда в метрах)

Для морской воды принято $\varepsilon = 86$, $\sigma = 3 \text{ См/м}$ [1]. Расчеты показывают [1], что слой льда с принятыми значениями $\sigma_{\text{л}}$ и $\varepsilon_{\text{л}}$ существенно изменяет величину поверхностного импеданса слоистой среды «лед-море»: увеличивает модуль

импеданса $|\delta|$ и смещает его фазу φ_δ сторону сильно-индуктивных импедансов. В ДВ-СВ диапазонах и низкочастотной области КВ-диапазона (на частотах до 5 МГц для толщины льда до 6 м) покрытые льдом акватории удовлетворяют импедансным граничным условиям, так как выполняется условие $|\delta|^2 \ll 1$. Частотные зависимости импеданса структуры «лед-море» показывают, что распространение радиоволн над покрытыми льдом морскими трассами имеет особенности, характерные для сильно-индуктивных трасс. Отметим, что распространение радиоволн над открытым морем и морем с ледовым покровом имеет существенные отличия. Слой льда изменяет амплитудно-фазовую структуру электромагнитного поля над границей раздела [1-6]. На рис.1 для наглядности дальнейшего анализа представлены графики $|W|$, $\varphi_{\text{доп}}$ и уровня поля E над радиотрассой «лед-море» на частоте 500 кГц на расстоянии от излучателя до 2000 км.

Результаты расчетов высотной зависимости поля ПЭВ над импедансной радиотрассой и их анализ

Рассмотрим расчеты функции ослабления над импедансной трассой «лед-море» на частоте 500 кГц. Из теории распространения радиоволн над слоистыми средами [9,10] следует, что над трассами с сильно-индуктивным импедансом появляется ПЭВ [6]. Эта волна, экспоненциально затухающая по высоте, представляет практический интерес, так как ее энергия убывает обратно пропорционально расстоянию от источника, в то время как энергия объемной электромагнитной волны убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

На рис. 2 и 3 представлены графики высотной зависимости модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E над радиотрассами «лед-море» и «море» на частоте 500 кГц на расстояниях от излучателя до 1000 км. На графиках видны два семейства кривых: (а) - для электромагнитного поля над радиотрассой «лед-море»; (б) – для поля земной волны над чистым морем.

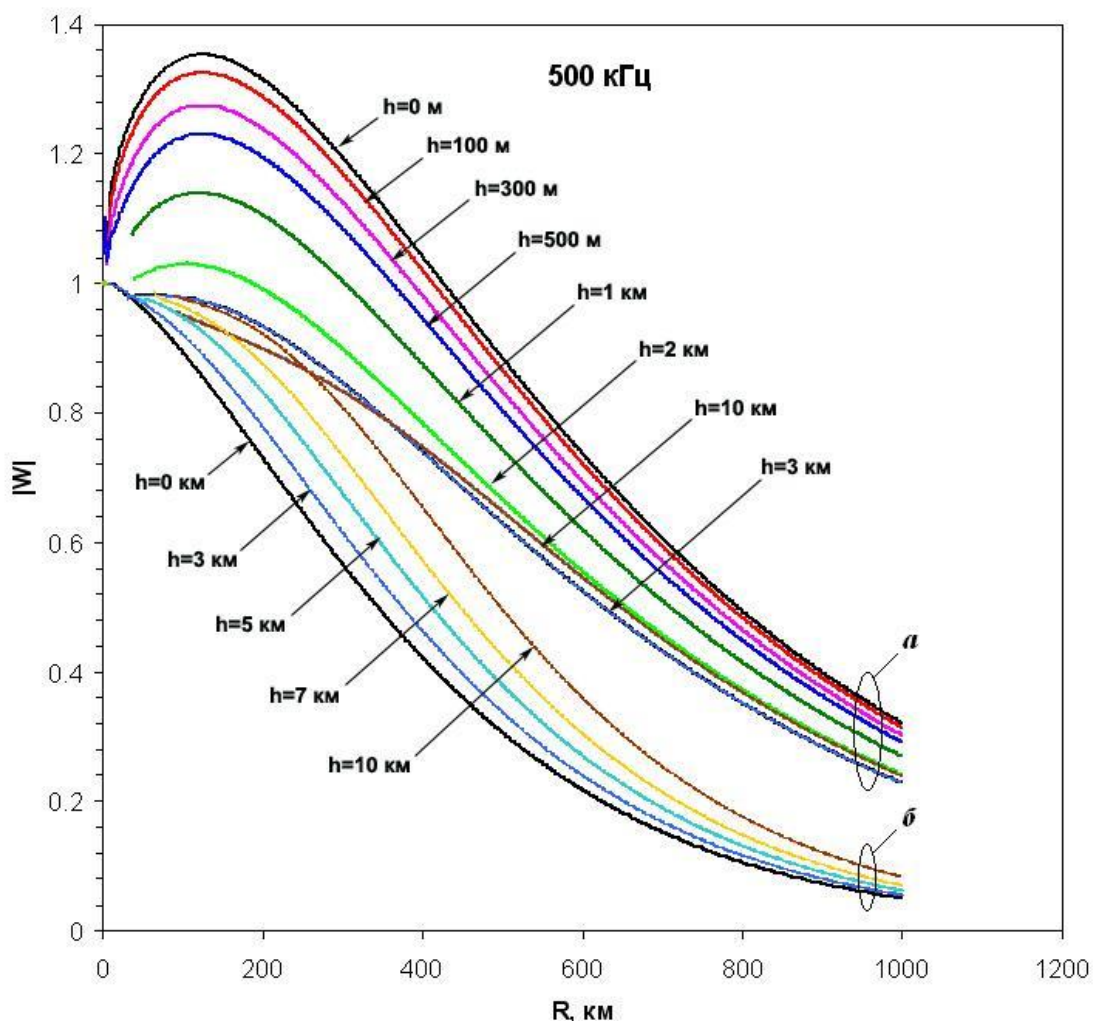


Рис. 2. Графики высотной зависимости модуля функции ослабления $|W|$ над радиотрассами «лед-море» (а) и «море» (б) на частоте 500 кГц на расстоянии от излучателя до 1000 км (числа на графиках – высота приема в метрах и километрах над ледовой или морской поверхностью)

Сравнение численных данных для функции ослабления $|W|$ и уровня поля E для трассы «лед-море» с толщиной льда 2 метра на расстояниях до 1000 км показало, что условия распространения радиоволн над покрытыми льдом морскими трассами при сильно-индуктивном поверхностном импедансе более благоприятны, чем над однородной морской поверхностью. На частоте 500 кГц модуль функции ослабления $|W|$ над ледовой трассой на протяжении 1000 км почти всегда выше $|W|$ над однородной морской поверхностью (рис. 2). Он уменьшается при увеличении высоты приема. Для $|W|$ над морем происходит

его небольшой рост при увеличении высоты приема. Этот эффект вполне закономерен при распространении над однородной сферической поверхностью.

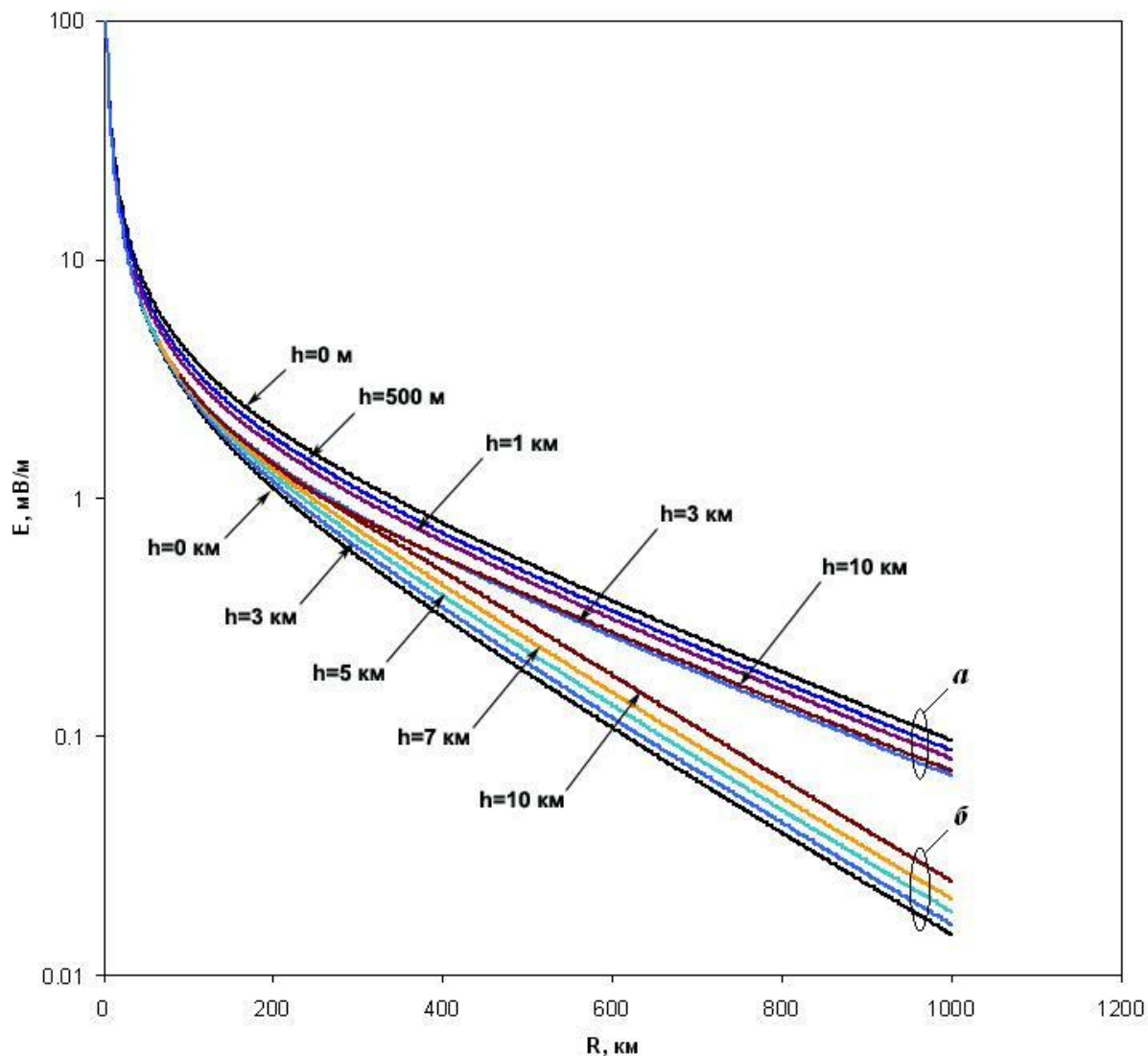


Рис.3. Графики высотной зависимости уровня поля E над радиотрассами «лед-море» (а) и «море» (б) на частоте 500 кГц на расстоянии от излучателя до 1000 км (числа на графиках – высота приема в метрах и километрах над ледовой или морской поверхностью)

Поле над ледовой трассой на протяжении 1000 км также всегда выше поля над однородной хорошо проводящей морской поверхностью (рис. 3). Оно уменьшается при увеличении высоты приема. Этот эффект обусловлен концентрацией поля над сильно-индуктивной поверхностью раздела сред. Для уровня поля над морем происходит его небольшой рост при увеличении высоты

приема. Отметим, что уменьшение уровня поля при увеличении высоты приема экспериментально подтверждено в работе [11].

Проведем количественный анализ высотной зависимости $|W|$ на частоте 500 кГц. Из графиков на рис. 2 следует, что $|W|$ имеет характерный для ПЭВ пространственный максимум $|W|_{\text{макс.}} = 1,35$ на расстоянии $R_{\text{макс.}} = 127$ км. Пространственная область существования поля, когда $|W| \geq 1$, равна 428 км. В табл. 1 представлены расчетные значения $|W|$ и E при изменении высоты приема от 0 м до 3 км для случаев (а) и (б).

Таблица 1

Высотная зависимость модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E на частоте 500 кГц и расстоянии от излучателя 127 км

$h, \text{ м}$	"лед-море"		"море"	
	$ W $	$E, \text{ мВ/м}$	$ W $	$E, \text{ мВ/м}$
0	1,35	3,19	0,852	2,012
50	1,34	3,17	0,851	2,01
100	1,33	3,14	0,85	2,007
200	1,3	3,07	0,849	2,006
300	1,27	3	0,848	2,003
400	1,25	2,95	0,847	2
500	1,23	2,9	0,847	2
1000	1,14	2,69	0,849	2,005
2000	1,027	2,42	0,865	2,043
3000	0,97	2,29	0,885	2,09

Сравнение численных данных для $|W|$ и уровня поля E для ледовой трассы на расстояниях до 1000 км показало, что при сильно-индуктивном импедансе условия распространения радиоволн над ледовыми трассами при $|W| > 1$ более благоприятны, чем над однородной идеально проводящей поверхностью и при приеме на высотах до 10 км.

Из табл. 1 следует, что на частоте 500 кГц $|W|$ и E над ледовой морской трассой монотонно уменьшаются при увеличении высоты приема. При этом $|W|$ и E для поля над морем почти не увеличивается, а остается на примерно

одинаковом уровне. Это постоянство можно объяснить тем, что трасса длиной 127 км на частоте 500 кГц еще не учитывает сферичность земной поверхности.

Из графиков на рис. 2 и 3 отчетливо видно, что появление ПЭВ над покрытой льдом морской трассой и расстояния ее существования вдали от излучателя прослеживаются на всем анализируемом расстоянии до 1000 км.

В табл. 2 приведены расчеты по ряду Фока модуля функции ослабления $|W|$ и уровня поля E на частоте 500 кГц (близка к частоте 518 кГц службы ГМССБ) на расстояниях 100, 200, 400, 500, 700 и 1000 км от источника над открытым морем и при толщине льда 2 м для излучаемой мощности 1 кВт. Анализ численных данных свидетельствует о том, что условия распространения радиоволн над ледовыми трассами более благоприятны, чем над открытым морем.

Таблица 2

Уровень поля на частоте 500 кГц в зависимости от расстояния и высоты приема для трассы над морем(б) и морем со льдом(а)

$h, м$		$R=100 км$		$R=200 км$		$R=400 км$		$R=500 км$		$R=700 км$		$R=1000 км$	
		$ W $	$E, мВ/м$	$ W $	$E, мВ/м$	$ W $	$E, мВ/м$	$ W $	$E, мВ/м$	$ W $	$E, мВ/м$	$ W $	$E, мВ/м$
0	<i>море</i>	0,894	2,68	0,73	1,095	0,422	0,316	0,305	0,183	0,152	0,065	0,05	0,015
	<i>лед-море</i>	1,348	4,044	1,315	1,973	1,041	0,78	0,884	0,53	0,606	0,26	0,32	0,096
100	<i>море</i>	0,892	2,676	0,73	1,095	0,42	0,315	0,305	0,183	0,151	0,065	0,049	0,015
	<i>лед-море</i>	1,32	3,96	1,288	1,932	1,02	0,765	0,866	0,52	0,593	0,254	0,313	0,094
1000	<i>море</i>	0,89	2,67	0,73	1,095	0,423	0,317	0,307	0,184	0,152	0,065	0,049	0,015
	<i>лед-море</i>	1,137	3,41	1,105	1,66	0,875	0,656	0,73	0,438	0,509	0,218	0,27	0,08
3000	<i>море</i>	0,92	2,76	0,777	1,165	0,46	0,346	0,336	0,202	0,167	0,072	0,054	0,016

Так, на расстоянии 400 км уровень поля над морем на «нулевой» высоте приема составляет $E = 316$ мкВ/м, а над структурой «лед – море» с толщиной льда 2 метра – $E = 780$ мкВ/м. Увеличение уровня поля составляет 2,5 раза. На расстоянии 700 км это увеличение достигает уже 4 раза. На высоте приема 1000 м поле над морем остается одинаковым с полем на «нулевой» высоте, а поле над ледовой трассой хотя и уменьшилось до 656 мкВ/м, но превышает в 2.07 раза поле над морем. Близкие по величине соотношения сохраняются и на больших дальностях до 1000 км.

Результаты моделирования показывают сильное влияние ледового покрова на распространение радиоволн ДВ-СВ диапазонов и при приеме на высоте над ледовой поверхностью. Полученные численные результаты следует учитывать при выборе рабочих частот ДВ-СВ радионавигационных и связных систем в покрытых льдом морских арктических районах.

Заключение

На основе сравнения высотных зависимостей $|W|$ и E на частоте 500 кГц для радиотрасс «лед-море» и «море» длиной до 1000 км показано, что условия распространения радиоволн над покрытым льдом морем на высотах приема до 10 км всегда более благоприятны, чем над открытым морем. При анализе численных результатов для $|W|$ и уровня поля E установлено, что условия распространения радиоволн над ледовыми трассами зависят от высоты приема. Электромагнитное поле, возбуждаемое вертикальным электрическим диполем над слоистой структурой «лед-море», имеющей сильно-индуктивный поверхностный импеданс существенно превышает поле земной волны над открытым морем. На частоте 500 кГц модуль функции ослабления $|W|$ над ледовой трассой на протяжении 1000 км всегда выше $|W|$ над однородной морской поверхностью. Он уменьшается при увеличении высоты приема. Для $|W|$ над морем при увеличении высоты приема происходит его рост. Поле над ледовой трассой на протяжении 1000 км также всегда выше поля над однородной хорошо проводящей морской поверхностью. Оно уменьшается при

увеличении высоты приема. Этот эффект обусловлен концентрацией поля над сильно-индуктивной поверхностью раздела сред. Для поля над морем при увеличении высоты приема происходит его небольшой рост. Численные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных рабочих частот ДВ-СВ радиолиний большой и средней дальности и оценки эффективности каналов связи и навигации в Северном Ледовитом океане. Отметим, что электромагнитное поле на частоте 500 кГц существует до больших высот приема, что практически важно при организации радиолиний связи и навигации, например, между дрейфующими полярными станциями и летательными аппаратами (самолетами и вертолетами), а также для трансполярных воздушных трасс. Результаты моделирования дают основание для проведения экспериментов над структурой «лед - соленая вода» с использованием беспилотных летательных аппаратов, способных поднять радиоизмерительный комплекс весом до 2 кг на высоту 1-2 км. Необходимо продолжить численное моделирование высотной зависимости электромагнитного поля для разных частот, толщин льда и расстояний до излучателя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01079) в Институте физического материаловедения СО РАН.

Литература

1. Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Моделирование распространения ДВ-, СВ-, КВ-радиоволн над покрытым льдом морем // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 1 (28). С. 89-101.
2. Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Дембелов М.Г. и др. Методы и результаты расчетов напряженности поля земной волны для ДВ-, СВ-, КВ-каналов связи на высокоширотных многокусочных импедансных трассах // Техника радиосвязи. 2015. № 1(24). С. 3-15.
3. Башкуев Ю.Б., Нагуслаева И.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Электрометрический метод определения поверхностного импеданса

- двухслойной структуры «лед - морская вода» // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 153-155.
4. Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Нагуслаева И.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Буянова Д.Г. Частотный критерий появления поверхностной электромагнитной волны над слоистой структурой «лед-соленая вода» // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 5. С. 400-408.
 5. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Куценко С.М., Аюров Д.Б. Некоторые результаты радиоволновых измерений в высоких широтах (район поселка Тикси) // Техника радиосвязи. 2015. № 4(27). С. 60-71.
 6. 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.
 7. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. Радио, 1970. 517 с.
 8. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Физматлит, 1999. 496 с.
 9. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991. 196 с.
 10. Wait J.R. Electromagnetic waves in stratified media. Pergamon Press. New York-Paris, 1962. 372 p.
 11. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Поле над двухслойной средой «лед-соленая вода» // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8-2. С. 35-37.

Ссылка на статью:

Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов. Высотная зависимость электромагнитного поля над ледовой морской трассой на частоте 500 кГц. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar17/4/text.pdf>