

02;05;11

Экспериментальное доказательство существования поверхностной электромагнитной волны

© Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов, М.Г. Дембелов

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, Улан-Удэ
E-mail: buddich@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2009 г.

Рассмотрены результаты эксперимента по распространению поверхностных электромагнитных волн декаметрового диапазона (10 и 15 МГц), возбуждаемых вертикальным диполем над покрытой льдом поверхностью соленого озера на трассе протяженностью до 1.2 km. Показано, что поверхностная волна затухает значительно слабее, чем „земной“ луч. В поле излучения вертикального диполя фиксируется наличие волны, амплитуда которой убывает с расстоянием R до излучателя примерно так же, как $1/R^{1/2}$, что соответствует расходимости поверхностной волны. Получены значения модуля функции ослабления $|W|$, существенно превышающие единицу и достигающие $|W| \approx 2$, которые обусловлены поверхностной волной. Данные по затуханию поверхностной волны, полученные в эксперименте, согласуются с результатами численных расчетов электромагнитного поля.

В статьях [1–4] сделан вывод о необходимости продолжить теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных волн, в том числе и поверхностных электромагнитных волн Ценнека. Для экспериментального доказательства существования поверхностной электромагнитной волны в марте 2009 г. были выполнены измерения уровня поля над двухслойной импедансной радиотрассой „лед–соленая вода“ на акватории озера Сульфатное (координаты излучателя 51°21.82' с.ш., 106°33.32' в.д.).

Измерения напряженности поля при распространении радиоволн вдоль плоской двухслойной трассы „лед–соленая вода“ проводились измерителем напряженности поля FSM-6.5 на частотах 10 и 15 МГц. В качестве излучателя использовался вертикальный штырь высотой 5 м, антенна подключалась к передатчику, состоящему из генератора стан-

дартных сигналов Г-4-116 и усилителя высокочастотного У-3-33. Эффективная излучаемая мощность во время эксперимента поддерживалась постоянной. Для контроля уровня поля использовался малогабаритный индикатор ($l \ll \lambda$), расположенный вблизи антенны (l — длина измерительного диполя, λ — длина волны). Расстояние R между излучателем и приемником достигало 1.2 km. Трасса была размечена через 10–50 m с помощью мерной ленты.

Толщина слоя льда в точке расположения излучателя составляла 1 m при глубине озера 7 m. Удельное электрическое сопротивление соленой воды $\rho = 1.1 \Omega \cdot \text{m}$ (или обратная ему электропроводность воды $\sigma = 1/\rho$ составляла 0.9 S/m). Скин-слой на частотах 10 и 15 MHz при электропроводности воды 0.9 S/m не превышает 0.17 m. Таким образом, трассу распространения радиоволн по всей длине можно считать двухслойной „лед–соленая вода“ с толщиной льда 1 m и глубиной до 7 m.

На частотах 10 и 15 MHz слой льда толщиной 1 m можно считать тонким, при этом поверхностный импеданс двухслойной структуры „лед–соленая вода“ попадает в сильноиндуктивную область [5]. Расчеты поверхностного импеданса дали следующие его значения: $f = 10 \text{ MHz} - \delta = 0.185$, $\arg \delta = -82.5^\circ$, $f = 15 \text{ MHz} - \delta = 0.291$, $\arg \delta = -82.8^\circ$. Из-за наличия тонкого плохопроводящего слоя льда h на соленой воде в импедансе двухслойной среды появляется аддитивная к импедансу соленой воды δ_w добавка ikh , линейно зависящая от толщины льда $\delta = \delta_w - ikh$. При этом электрические свойства льда почти не влияют на величину импеданса [5,6].

Измерения напряженности поля E_i и модуля функции ослабления $|W|$ проведены методом радиокомпарирования. Его теоретической основой является решение задачи о распространении радиоволн вдоль поверхности с произвольным поверхностным импедансом [4,5]. При экспериментальном выделении поверхностной волны проведены относительные высокоточные измерения напряженности вертикальной составляющей электрического поля E_i вдоль прямого луча на разных расстояниях от излучателя $E_i(R_i)$ и затем выполнено сравнение зависимостей теоретических и экспериментальных значений уровня поля и модуля функции ослабления от расстояния до излучателя.

Экспериментальные значения модуля функции ослабления $|W|$ определены нормированием произведения измеренных значений напряженности вертикальной составляющей электрического поля E_i на

расстояние до излучателя R_i к величине E_0R_0 на „базисном“ пункте измерения, где $|W|$ принимается равной 1 ($|W| = 1$ при $R = \lambda$):

$$|W_i| = \frac{E_i R_i}{E_0 R_0}.$$

Измерения напряженности поля проведены с помощью измерителя напряженности поля FSM-6.5., состоящего из селективного микровольтметра SMV-6.5. и антенного устройства FMA-6. Усиление приемника калибруется с помощью встроенного генератора синусоидальных сигналов. Антенное устройство FMA-6.2 имеет согласующие цепи, элементы настройки антенн и антенный усилитель, используемый для измерения малых сигналов. При приеме сигналов на магнитную антенну вертикальная электрическая составляющая E_i электромагнитного поля определялась по формуле

$$E_i = 10^{(K+I)/20} \mu\text{V/m},$$

где K — коэффициент усиления антенны в дБ, определяемый по калибровочным графикам, I — показания прибора в дБ.

Использование магнитной антенны уменьшало влияние проводимости подстилающей среды в месте приема и оператора на величину измеряемого поля. Результаты измерения представлены в табл. 1, 2. Антенный коэффициент $K = 34$ дБ на обеих частотах.

В эксперименте источник излучения и приемник расположены непосредственно у границы раздела „воздух–подстилающая среда“ и длина трассы не превышала 1.2 км. В этом случае применима модель плоской подстилающей среды, так как расстояние от излучателя до приемника $R[\text{km}] < 7^3 \sqrt{\lambda[\text{m}]}$, т.е. при $\lambda \leq 30$ м всегда $R < 21$ км. Ширина трассы радиоволн (первая зона Френнеля) имеет вид вытянутого эллипса с фокусами в точках излучения и приема и определяется соотношением: $2b \cong \sqrt{\lambda R}$. При $R \leq 1.2$ км и $\lambda \leq 30$ м $2b \leq 189$ м.

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; R — расстояние от источника поля до точки приема; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $1/(ikR)$ — индукционный,

Таблица 1. Результаты измерений уровня поля на частоте 10 MHz ($\lambda = 30$ m)

N	R, m	U_{in} , dB	E , μ V/m	W
1	30	31.7	1778	1
2	60	27.7	1216	1.36
3	90	24.7	861	1.45
4	200	19.8	490	1.84
5	400	14.5	266	2.0
6	600	9.8	155	1.74
7	700	7.1	114	1.49
8	800	4.3	82	1.23
9	900	2.4	66	1.11
10	1000	0.35	52	0.98
11	1100	-2.7	37	0.76
12	1200	-3.5	33	0.75

Таблица 2. Результаты измерений уровня поля на частоте 15 MHz ($\lambda = 20$ m)

N	R, m	U_{in} , dB	E , μ V/m	W
1	20	47.5	11885	1
2	30	47.7	12162	1.53
3	40	45.3	9226	1.55
4	50	44	7943	1.67
5	60	43	7080	1.79
6	70	42	6310	1.86
7	80	41	5623	1.89
8	90	40	5012	1.9
9	100	39.5	4731	1.99
10	150	35.2	2884	1.82
11	200	30.08	1738	1.46
12	250	26.7	1084	1.14
13	300	22	631	0.8
14	350	17.7	385	0.57
15	400	14.4	263	0.44
16	450	11.1	180	0.34
17	500	6.6	107	0.22
18	600	-5.8	25.7	0.065
19	700	-8.1	19.7	0.058

$1/(ikR)^2$ — статические члены, которые „участвуют“ в формировании поля в ближней зоне излучателя; $W(SR)$ — функция ослабления поля относительно бесконечно проводящей плоскости; SR — численное расстояние, $S = ik\delta^2/2$ при $|\delta^2| \ll 1$, δ — приведенный поверхностный импеданс трассы (зависимость от времени $e^{-i\omega t}$);

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

При больших значениях $|SR|$, учитывая разложение интеграла вероятности от комплексного аргумента $\int_{\sqrt{SR}}^{+\infty} e^{z^2} dz$, имеем

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

Выражение функции ослабления над сильноиндуктивной трассой содержит член $W_{surf} = 2i\sqrt{\pi SR}e^{-SR}$, соответствующий поверхностной волне. Максимум поверхностной волны, равный $|W_{surf}| = 2\sqrt{\pi|S|R}e^{-kR|\operatorname{Im}\delta| \cdot \operatorname{Re}\delta}$, наблюдается на расстоянии $R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi \operatorname{Re}\delta |\operatorname{Im}\delta|}$. В частности, при $\lambda = 30$ м и $\delta = 0.185e^{-i82.5^\circ}$ расчеты дают $R_{\max} = 540$ м, $|W_{surf}| = 2.91$, а при $\lambda = 20$ м и $\delta = 0.291e^{-i82.8^\circ}$ $R_{\max} = 151$ м, $|W_{surf}| = 3.05$. На расстояниях $R \gg R_{\max}$ поверхностная волна экспоненциально затухает и имеет место единая асимптотическая формула $W(SR) = -1/(2SR)$.

На рис. 1, 2 представлены для сравнения результаты измерений и расчетов поля. Из графиков наглядно видно качественное сходство расчетных и измеренных значений как уровня поля, так и модуля функции ослабления. Численные отличия обусловлены, по нашему мнению, нормировкой модуля функции ослабления к единице при $R = \lambda$, а также тем, что использованы расчетные значения поверхностного импеданса структуры „лед-соленая вода“, а непосредственные измерения импеданса не проводились. На частотах 10 и 15 МГц отчетливо выделяются значения модуля функции ослабления $|W|$, существенно превышающие единицу и достигающие $|W| \approx 2$, которые соответствуют поверхностной

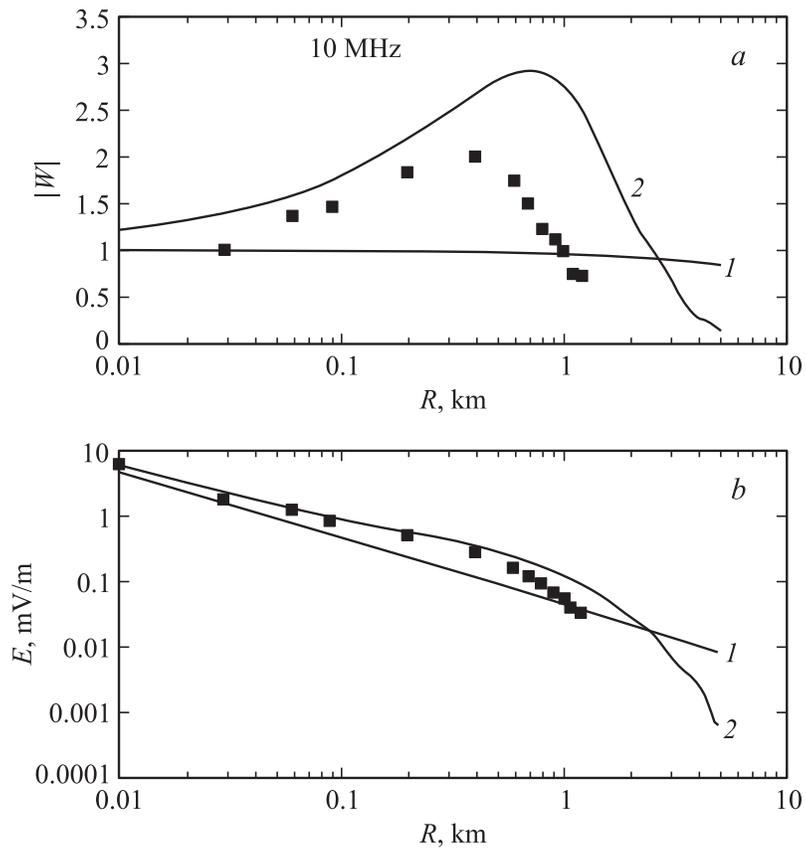


Рис. 1. Зависимость модуля функции ослабления (*a*) и уровня поля (*b*) от расстояния на частоте 10 МГц. Сплошные линии — расчет (1 — радиотрасса над соленой водой, 2 — радиотрасса „лед–соленая вода“). Черные квадратики — эксперимент.

волне. Сравнение зависимостей теоретических и экспериментальных значений уровня поля показывает, что в поле излучения вертикального диполя фиксируется наличие волны, амплитуда которой убывает с расстоянием R до излучателя примерно как $1/R^{1/2}$, что соответствует расходимости поверхностной волны.

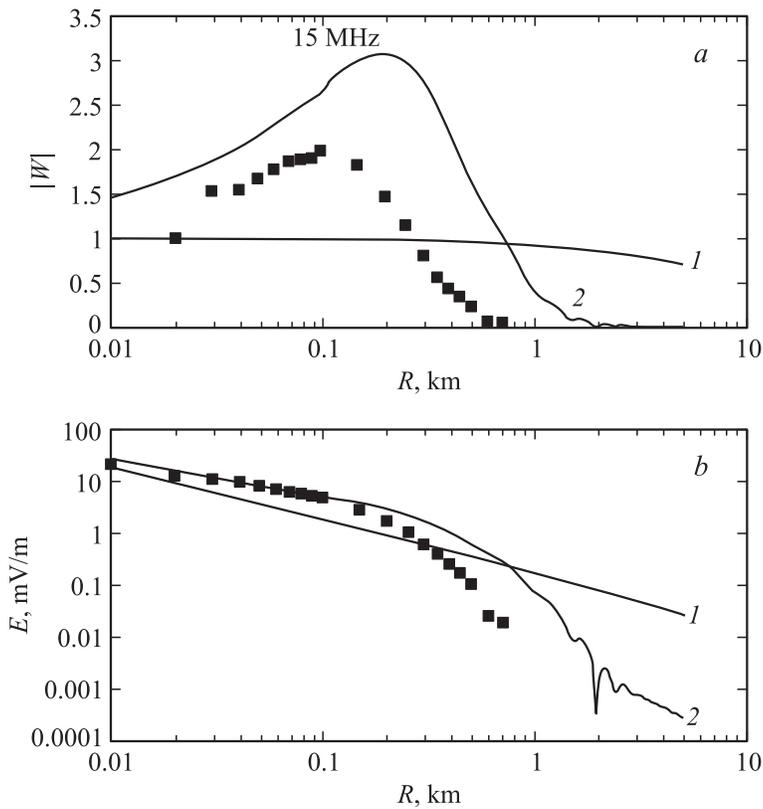


Рис. 2. Зависимость модуля функции ослабления (*a*) и уровня поля (*b*) от расстояния на частоте 15 МГц. Сплошные линии — расчет (1 — радиотрасса над соленой водой, 2 — радиотрасса „лед–соленая вода“). Черные квадратики — эксперимент.

Таким образом, эксперимент по распространению электромагнитных волн декаметрового диапазона (10 и 15 МГц), возбуждаемых вертикальным диполем над покрытой льдом поверхностью соленого озера на трассе протяженностью до 1.2 км, полностью доказывает существование поверхностной электромагнитной волны. Данные по относительному затуханию поверхностной волны, полученные в экс-

перименте, хорошо согласуются с результатами численных расчетов электромагнитного поля. Экспериментально показано, что на частотах 10 и 15 МГц поверхностная волна затухает значительно слабее, чем „земной“ луч. Эксперимент выполнен над твердой подстилающей поверхностью [3].

Список литературы

- [1] *Дацко В.Н., Копылов А.А.* // УФН. 2008. Т. 178. В. 1. С. 109–110.
- [2] *Байбаков В.И., Дацко В.Н., Кистович Ю.В.* // УФН. 1989. Т. 157. В. 722–724.
- [3] *Кукушкин А.В.* // УФН. 2009. Т. 179. В. 7. С. 801–803.
- [4] *Макаров Г.И., Новиков В.В.* / РЭ. 2000. Т. 45. № 9. С. 1029–1036.
- [5] *Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т.* Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991.
- [6] *Нагуслева И.Б., Башкуев Ю.Б.* // XXII Всероссийская научная конференция „Распространение радиоволн“. Ростов-на-Дону, 2008. Т. III. С. 203–206.