

**В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев, Л.Х. Ангархаева**  
**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**  
**ФУНКЦИИ ОСЛАБЛЕНИЯ**  
**НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА СУЛЬФАТ\***

Рассмотрена пространственная характеристика модуля функции ослабления  $|W|$  для озера Сульфат, находящегося на юге Сибири. В зимне-весенний период озеро Сульфат является двухслойной структурой «лед – соленая вода». В декаметровом диапазоне радиоволн такая слоистая структура имеет сильно индуктивный поверхностный импеданс и описывается эффективной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_+$ , имеющей большие отрицательные численные значения. Для рассматриваемого озера пространственная характеристика модуля функции ослабления  $|W|$  на протяжении сотен метров оказывается больше 1, что соответствует появлению поверхностной электромагнитной волны.

Ключевые слова: поверхностные электромагнитные волны, слоистая среда, модуль функции ослабления, вертикальная электрическая антенна.

**Введение**

Интересным объектом изучения и применения являются поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ). ПЭВ называются волны, излученные вертикальной электрической антенной и распространяющиеся вдоль границы раздела «воздух-слоистая среда» и существующие одновременно в них обеих. Поля, переносимые этими волнами, локализованы вблизи поверхности и затухают в слоистой среде. ПЭВ являются одной из разновидностей земной волны, когда вблизи земной поверхности электрический вектор имеет большую вертикальную компоненту и небольшую величину вдоль своего распространения, в литературе такие волны часто называют частично продольными волнами ТМ-типа. Электрический вектор  $E$  имеет две составляющие:  $E_x$  – вдоль волнового вектора и  $E_z$  – перпендикулярно поверхности; магнитный вектор  $H$  перпендикулярен направлению распространения волны и лежит в плоскости поверхности.

Появлению ПЭВ удовлетворяют среды «диэлектрик на проводнике» в диапазоне до ГГц. Мы рассмотрим пространственную характеристику модуля функции ослабления  $|W|$  для озера Сульфат, находящегося на юге Сибири [1].

**Озеро Сульфат. Функция ослабления**

Некоторые среды регионов Земного шара являются сильно индуктивными, для которых фаза поверхностного импеданса  $\varphi$  попадает в интервал  $-45,1^\circ - -89,9^\circ$  [2, 3] и часто близка к  $-90^\circ$  [4]. Так, в работе [1] над двухслойной импедансной радиотрассой «лед – соленая вода» на акватории озера Сульфат в ходе натурных измерений и после проведения некоторых расчетов было установлено, что на частоте  $f = 10$  МГц модуль поверхностного импеданса  $|\delta| = 0,185$  и фаза  $\varphi = -82,5^\circ$ . Поверхностный импеданс может быть записан в виде  $\delta = 0,024 - i 0,183$ .

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01079) в Институте физического материаловедения Сибирского Отделения Российской Академии наук.

Эффективный поверхностный импеданс  $\delta$  для однородной среды дается следующим выражением [3]:

$$\delta = |\delta| \exp(i\varphi) = \left\{ 1 + \varepsilon_- + \frac{i}{\varepsilon_0 \omega \rho_-} \right\}^{-1/2}.$$

Отсюда находим эффективные значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_-$  и удельного электрического сопротивления  $\rho_-$  [4], выраженные через модуль  $|\delta|$  и фазу  $\varphi$  поверхностного импеданса:

$$\varepsilon_- = \frac{\cos 2\varphi}{|\delta|^2} - 1, \quad \rho_- = \frac{60\lambda |\delta|^2}{-\sin 2\varphi}.$$

Для озера Сульфат, используя  $\lambda = 30$  м,  $|\delta| = 0,185$  и  $\varphi = -82,5^\circ$ , получаем  $\varepsilon_- = -30$  и  $\rho_- = 283$  Ом·м. Видим, что эффективное значение диэлектрической проницаемости принимает большое отрицательное значение, так что условие  $\varepsilon_- < -1$  выполняется с большим запасом.

Если ввести волновое число  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве, то в волновой зоне на расстоянии  $R$  от излучателя выполняется неравенство  $kR \gg 1$ . Вертикальная составляющая электрического поля  $E$  при  $kR \gg 1$  будет описываться следующим выражением [4]:

$$E = 300\sqrt{P} \frac{W(SR)}{R}, \quad \text{где } S = ik\delta^2 / 2. \quad (1)$$

Здесь  $P$  – излучаемая мощность вертикальной электрической антенны,  $W(SR)$  – функция ослабления. Для сильно индуктивных радиотрасс  $Im\sqrt{SR} < 0$ , причем из-за того, что  $kR \gg 1$ , то  $|Im\sqrt{SR}| \gg 1$ . В этом случае функция ослабления дается следующим выражением:

$$W(SR) = 2i\sqrt{\pi SR} \exp(-SR). \quad (2)$$

Нас в дальнейшем будет интересовать только модуль функции ослабления  $|W|$ . Выражая все величины через длину волны и поверхностный импеданс, для пространственной характеристики модуля функции ослабления получаем:

$$|W| = 2\pi |\delta| \sqrt{\frac{R}{\lambda}} \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} R \operatorname{Re} \delta |Im\delta|\right). \quad (3)$$

Здесь  $\operatorname{Re} \delta$  и  $Im\delta$  – соответственно действительные и мнимые части импеданса. Существенно, что модуль функции ослабления проходит через max. Используя импеданс  $\delta = 0,024 - i 0,183$ , для озера Сульфат находим

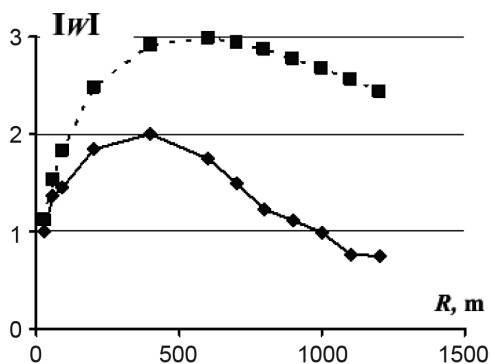
$$R_m = 550 \text{ м}, \quad |W|_m = 3.$$

В итоге модуль функции ослабления принимает следующий вид:

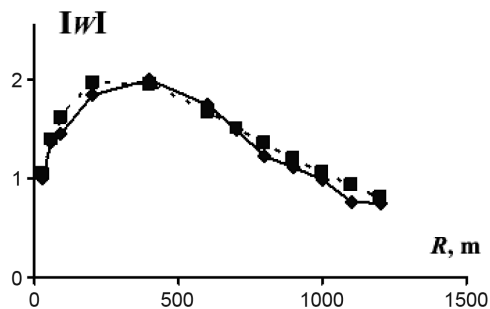
$$|W| = 0,21 \sqrt{R} \exp(-0,00091 R). \quad (4)$$

В работе [1] приводится установленная в ходе натуральных измерений и некоторых расчетов пространственная характеристика модуля функции ослабления – ее зависимость от расстояния между излучателем и пунктом измерения (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что если  $R_m$  удовлетворительно совпадают друг с другом, то максимумы для функции ослабления существенно различаются друг от дру-



**Рис. 1. Зависимость модуля функции ослабления от расстояния между излучателем (вертикальной электрической антенной) и местом приема вертикально поляризованной ПЭВ:** сплошная линия – результаты измерений, пунктирная линия – вычисленные по формуле (4)



**Рис. 2. Аппроксимация пространственной характеристики модуля функции ослабления:** сплошная линия с маркерами ромбом – результаты измерений, пунктирная линия с квадратными маркерами – вычисленные по формуле (6)

га. Возникает задача аппроксимации, чтобы вычисленная функция ослабления как можно ближе пожилась возле измеренных ее значений.

Имеем функцию

$$|W| = A \sqrt{R} \exp(-B R). \quad (5)$$

Необходимо найти коэффициенты  $A$  и  $B$ . Для этого использовался метод Гаусса, примененный им для линейных функций [5]. У нас отличие только в том, что справа в (5) стоит сложная функция от  $R$ . Оказывается

$$A = 0,191, \quad B = 0,00179.$$

Погрешность вычислений также можно найти по методу Гаусса, но при этом получаются громоздкие выражения. Мы погрешность нашли другим способом. Рассматривались разности между  $|W|$  (измеренные) и  $|W|$  (вычисленные). Эти значения усреднялись, и затем уже находилось, что погрешности для  $A$  и  $B$  составляли не более 5%.

Множитель  $A$  в (4) зависит только от характеристик электрической антенны и, поэтому, в формуле (6), где  $A = 0,21$ , и найденное в ходе аппроксимации  $A = 0,191$ , должны быть равны друг другу. Взяв их арифметическое среднее, можно найти, что  $A = 0,2$ . Это значение укладывается в погрешность 5%. Таким образом, наилучшая аппроксимация для модуля функции ослабления дается следующим выражением:

$$|W| = 0,2 \sqrt{R} \exp(-0,00178 R). \quad (6)$$

На рис. 2 показаны результаты измерений (сплошная линия с маркерами ромбом) и вычисленные по формуле (6) (пунктирная линия с квадратными маркерами). Наблюдаем более чем удовлетворительное совпадение измеренных и вычисленных значений модуля функции ослабления.

Из функции (6) по формуле (3) восстанавливаем импеданс:

$$\delta = 0,063 - i 0,139, \text{ или } |\delta| = 0,153, \quad \varphi = -65,5^\circ.$$

А также:  $|W|_{\max} = 2$ ,  $R_m = 281$  м. И далее:  $\varepsilon_- = -29$ ,  $\rho_- = 56$  Ом·м. Видим, что тах модуля функции ослабления удовлетворяет наблюдаемому значению, хотя расстояние для тах уменьшилось. Последнее связано с тем, что кривая модуля функции ослабления вблизи тах имеет пологий характер и следовало бы писать  $280 \text{ м} < R_m < 600 \text{ м}$ . Отметим также, что эффективные значения диэлектрической проницаемости для разных модулей функции ослабления (7) и (14) практически не изменились.

Выше установили, что для ПЭВ пространственная характеристика модуля функции ослабления удовлетворительно описывается закономерностью (6). Подставляя ее в (1), находим пространственную характеристику модуля вертикальной компоненты электрического поля:

$$|E| = 300\sqrt{P} \text{ А } \frac{1}{\sqrt{R}} \exp(-B R). \quad (7)$$

Сферическая волна, напомним, спадает как  $1/R$ .

### Заключение

Некоторые среды регионов Земного шара являются сильно индуктивными, как например озеро Сульфат на юге Сибири. В зимне-весенний период это озеро является двухслойной структурой «лед – соленая вода». В диапазоне частот МГц и выше такую структуру можно описывать эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_-$ , имеющую большие отрицательные численные значения, так для озера Сульфат  $\varepsilon_- \sim -30$ . Таким образом, для сильно индуктивных трасс можно говорить, что для таких трасс фаза поверхностного импеданса лежит в пределах  $-45,1^\circ - -89,9^\circ$ . Для рассматриваемой структуры пространственная характеристика функции ослабления на большом протяжении оказывается больше 1. В поле излучения вертикального электрического диполя формируется ПЭВ, амплитуда которой убывает с расстоянием  $R$  от излучателя как  $\exp(-B R) / \sqrt{R}$ .

---

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Экспериментальное доказательство существования поверхностной электромагнитной волны // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, Вып. 3. – С. 88–95.
2. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. – М.: Наука, 1991.
3. Балханов В.К., Башкуев Ю.Б. Основы теории метода поверхностного импеданса. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2005.
4. Цыдыпов Ч.Ц., Цыденов В.Д., Башкуев Ю.Б. Исследование электрических свойств подстилающей среды. – Новосибирск: Изд-во Наука. СО РАН, 1979.
5. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. – М.: Мир, 1985. – 272 с. **PIAB**

---

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Балханов Василий Карлович – кандидат технических наук,  
e-mail: ballar@yandex.ru,

Башкуев Юрий Буддич – доктор технических наук, профессор,  
e-mail: buddich@mail.ru,

Ангархаева Людмила Ханхараевна – кандидат физико-математических наук,  
доцент, e-mail: ludang@rambler.ru,

Институт физического материаловедения СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Россия, E-mail: ballar@yandex.ru.

## SPATIAL CHARACTERISTIC OF ATTENUATION FUNCTION IN TERMS OF THE LAKE SULFAT

Balkhanov V.K.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, e-mail: ballar@yandex.ru,  
Bashkuev Yu.B.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: buddich@mail.ru,  
Angarkhaeva L.Kh.<sup>1</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Assistant Professor, e-mail: ludang@rambler.ru,  
Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
670047, Ulan-Ude, Russia.

Under consideration is the spatial characteristic of attenuation function modulus  $|W|$  for the Lake Sulfat on the south of Siberia. In the winter/spring period, the Lake Sulfat is a two-layer ice-water structure. In the range of decameter wave, such a layered structure has highly inductive surface impedance and is described with an efficient dielectric permeability  $\epsilon_*$ , featuring high negative values. For the lake under discussion, the spatial characteristic of the attenuation function modulus  $|W|$  exceeds 1 for a length of hundreds of meters, which corresponds with the appearance of a surface electromagnetic wave.

Key words: surface electromagnetic waves, layered medium, attenuation function modulus, vertical electric antenna.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 14-19-01079) and implemented at the Institute of Physical Material Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

### REFERENCES

1. Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2010, vol. 36, issue 3, pp. 88–95.
2. Makarov G.I., Novikov V.V., Rybachek S.T. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln nad zemnoy poverkhnost'yu* (Propagation of electromagnetic waves over ground surface), Moscow, Nauka, 1991.
3. Balkhanov V.K., Bashkuev Yu.B. *Osnovy teorii metoda poverkhnostnogo impedansa* (Fundamentals of the theory of surface impedance method), Ulan-Ude, Izd-vo Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN, 2005.
4. Tsydyпов Ch.Ts., Tsydenov V.D., Bashkuev Yu.B. *Issledovaniye elektricheskikh svoystv podstilayushchey sredy* (Analysis of electrical properties of underlying medium), Novosibirsk, Izd-vo Nauka, SO RAN, 1979.
5. Teylor Dzh. *Vvedeniye v teoriyu oshibok* (An introduction to the theory of errors), Moscow, Mir, 1985, 272 p.



## ГОРНАЯ КНИГА НА МЕЖДУНАРОДНОМ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ ФОРУМЕ МАЙНЕКС РОССИЯ 2015

