

## СОЛЕННЫЕ ОЗЕРА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ КАК АНАЛОГИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ «ЛЕД-МОРЕ»

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

Институт физического материаловедения СО РАН  
Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.  
E-mail: [buddich@mail.ru](mailto:buddich@mail.ru)

*В докладе на примере трех соленых озер показано их электродинамическое подобие со слоистой структурой «лед – море», которая в зимнее время года покрывает 25-35 млн. км<sup>2</sup> Мирового океана. Определен сильно-индуктивный поверхностный импеданс таких структур в ОНЧ-НЧ и ВЧ диапазонах радиоволн. Установлено появление поверхностной электромагнитной волны на частотах 10,12,15 МГц.*

*Ключевые слова: поверхностный импеданс, георадар, лед, соленая вода*

## SALT LAKES OF THE CENTRAL ASIA AS ANALOGUES OF THE ELECTRODYNAMIC STRUCTURE “ICE-SEA”

Yu.B. Bashkuev, V.B. Khaptanov, M.G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the SB RAS  
Sakh'yanova str, Ulan-Ude, Russia  
E-mail: [buddich@mail.ru](mailto:buddich@mail.ru)

In the report an electromagnetic likeness of three lakes with “ice-sea” layered structure that covers 25-35 millions of square kilometers of the World Ocean is shown as an example. A high inductive surface impedance of such structures in VLF-LF and HF ranges of radio waves is revealed. An appearance of the surface electromagnetic wave on frequencies of 10, 12 and 15 MHz is established.

*Key words: surface impedance, georadar, ice, salt water*

Известно, что структуры типа «диэлектрик на проводнике» обладают сильноиндуктивным поверхностным импедансом. На востоке России примером таких структур являются многочисленные соленые озера в зимнее время (структура «лед-соленая вода»), в частности, оз. Сульфатное, Киран и Гуджирное. Исследования распространения электромагнитных волн (в том числе, функции ослабления  $W$ , уровня электромагнитного поля  $E$  и фазовой структуры земной волны  $\varphi_{дон}$ ) над такими структурами актуальны, в частности, при поисках природных «усилителей» электромагнитного поля. Цель работы - на примере соленых озер Центральной Азии показать их электродинамическое подобие со слоистой структурой «лед – море», которая в зимнее время года покрывает 25 млн.км<sup>2</sup> Мирового океана.

Методами радиоимпедансного и георадарного зондирования, кондуктометрии и бурения льда определены электрические свойства льда, воды и донного грунта высокопроводящих акваторий в ОНЧ-НЧ и СВЧ диапазонах в зимнее время. По данным интерпретации 106 радиоимпедансных зондирований на трех профилях общей длиной 3500 м определены геоэлектрические разрезы (ГЭР) соленых озер Сульфат, Киран и Гуджирное на глубину скин-слоя. Результаты измерений и интерпретации представлены

на рис.1. Оз. Сульфат глубиной 6-7 метров и оз. Киран с уникальными лечебными грязями глубиной 1-2 метра имеют высокую минерализацию воды с УЭС 0,9 – 1,2 Ом.м, сравнимую с морской водой. При этом глубина оз. Сульфат превышает скин-слой на частоте 279 кГц, составляющий 5 м, и среду можно считать двухслойной «лед-соленая вода». На этих частотах слой льда толщиной 1 м можно считать тонким. В импедансе двухслойной среды  $\delta$  появляется аддитивная к импедансу воды  $\delta_B$  добавка  $-ikh_L$ , линейно зависящая только от толщины слоя льда  $h_L$ , т.е.  $\delta = \delta_B - ikh_L$ . При этом электрические свойства слоя льда очень слабо влияют на изменение импеданса. Наличие тонкого плохо проводящего слоя льда на хорошо проводящей воде приводит к изменению мнимой части импеданса на величину, равную  $kh_L$  и смещению фазы импеданса в сильно-индуктивную область. Этот эффект необходимо учитывать при исследованиях поверхностной волны над ледовыми полями. По данным радиоимпедансного профилирования в зимнее время (рис.2) установлена резкая смена типа импедансной структуры «слабоиндуктивная-сильноиндуктивная - слабоиндуктивная». Над ледовой поверхностью озера импеданс всегда попадает в сильно-индуктивную область и достигает на частоте 279 кГц  $-74^\circ$ .

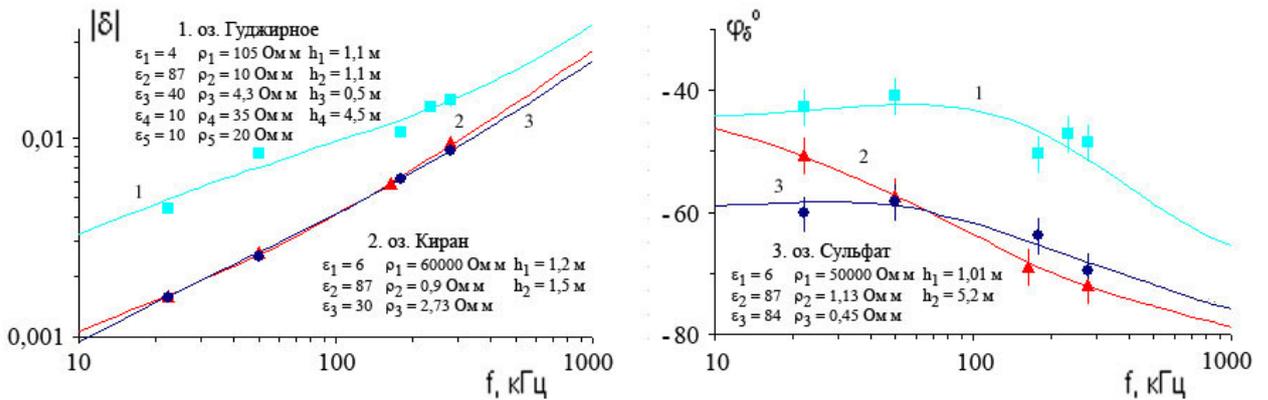


Рис. 1. Результаты интерпретации частотных зависимостей поверхностного импеданса.

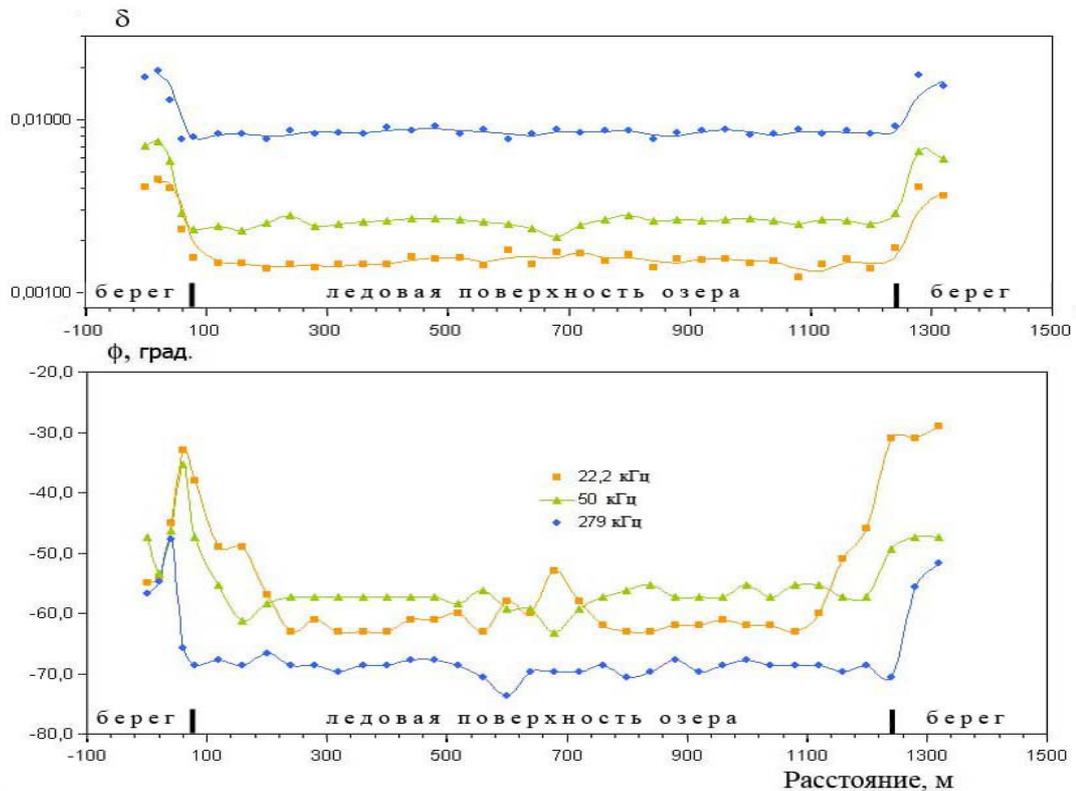


Рис. 2. Изменение поверхностного импеданса на профиле оз. Сульфат длиной 1300м.

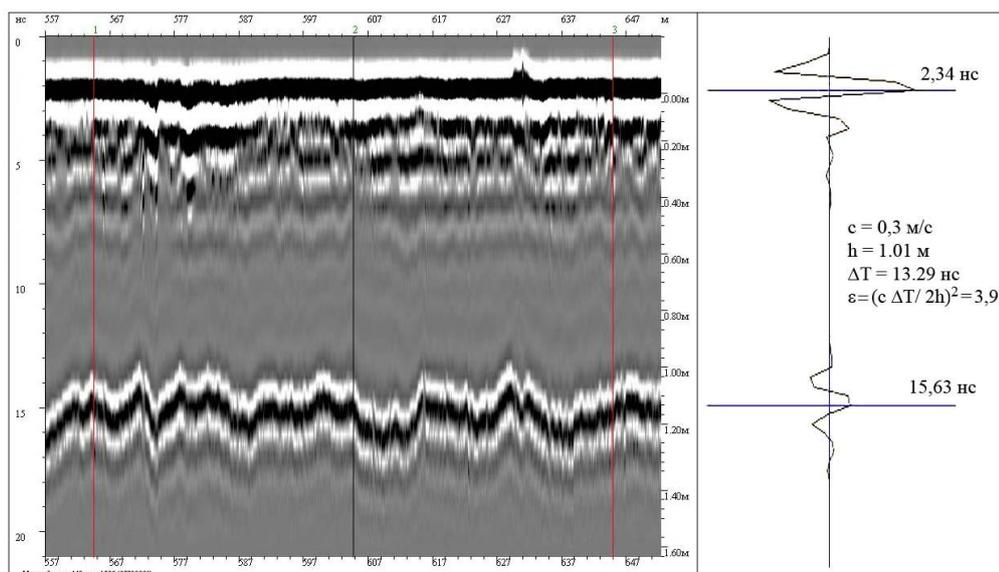


Рис. 3. Фрагмент георадарного профиля на оз. Сульфат и определение  $\epsilon$  по «визирке».

Определение диэлектрической проницаемости слоя льда проведено по данным георадара ОКО-2 в пункте бурения скважины во льду (рис.3). Полученное значение  $\epsilon = 3,9$  попадает в середину интервала возможных значений  $\epsilon$  для соленого льда  $\epsilon = 3-9$ . Разработанная методика комплексирования радиоимпедансного и георадарного зондирования и кондуктометрии может быть использована для донного электрического картирования рек, озер и прибрежной зоны акватории Северного Ледовитого океана по удельному сопротивлению в рамках многослойной модели дна с хорошо и плохо проводящим основанием. Методика отработана на объектах-аналогах.

Из теории распространения электромагнитных волн над слоистыми средами следует, что над трассами с сильноиндуктивным импедансом поле может превышать поле над бесконечно проводящей плоскостью за счет появления поверхностной волны. Для экспериментального доказательства существования поверхностной электромагнитной волны выполнены измерения уровня поля над двухслойной радиотрассой «лед-соленая вода» на акватории оз. Сульфатное в марте 2009 г. и марте-апреле 2010 г.. Толщина льда в точке расположения излучателя составляла 1 м при глубине озера 7 м. Электропроводность соленой воды составляла 0.9 См/м, а скин-слой на частотах 10-15 МГц не превышал 0.17 м. Таким образом, трассу распространения радиоволн по всей длине 1,2 км можно считать двухслойной «лед-соленая вода» с толщиной льда 1 м и глубиной до 7 м. На частотах 10 и 15 МГц расчеты поверхностного импеданса дали следующие его значения: при  $f = 10$  МГц  $|\delta| = 0.185$ ,  $\arg \delta = -82.5^\circ$ ,  $f = 15$  МГц,  $|\delta| = 0.291$ ,  $\arg \delta = -82.8^\circ$ . На рис. 4 для сравнения представлены результаты измерений и расчетов поля. Из графиков наглядно видно качественное сходство расчетных и измеренных значений, как уровня поля, так и модуля функции ослабления. На частотах 10 и 15 МГц отчетливо выделяются значения модуля функции ослабления  $|W|$ , существенно превышающие единицу и достигающие  $|W| \approx 2$ , которые соответствуют поверхностной волне. Сравнение зависимостей теоретических и экспериментальных значений уровня поля показывает, что в поле излучения вертикального диполя фиксируется наличие волны, амплитуда которой убывает с расстоянием  $R$  от излучателя примерно как  $1/R^{1/2}$ , что соответствует расходимости поверхностной волны. В марте-апреле 2010 г. на акватории оз. Сульфатное измерена также вертикальная структура поля над трассой «лед-соленая вода». На рис. 5. представлены результаты измерений вертикальной структуры

поля на частотах 10, 12 и 15 МГц и расстояниях от излучателя 200, 125 и 150 м, соответственно. Из графиков видно экспоненциальное затухание поля по высоте, что является важным отличительным признаком поверхностной волн. Таким образом, эксперименты по распространению электромагнитных волн ВЧ диапазона, возбуждаемых вертикальным диполем над покрытой льдом поверхностью соленого озера доказали существование поверхностной электромагнитной волны.

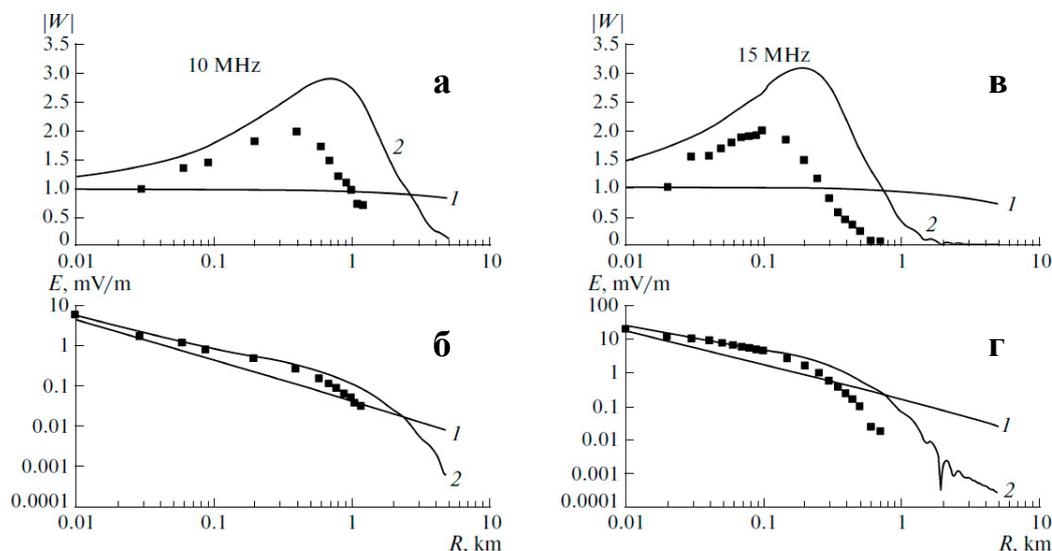


Рис. 4. Зависимости модуля функции ослабления (а, в) и уровня поля (б, г) от расстояния на частотах 10 (а-б) и 15 (в-г) МГц. Сплошные линии – расчет (1 – радиотрасса над соленой водой, 2 – радиотрасса «лед-соленая вода»). Черные квадраты – эксперимент.

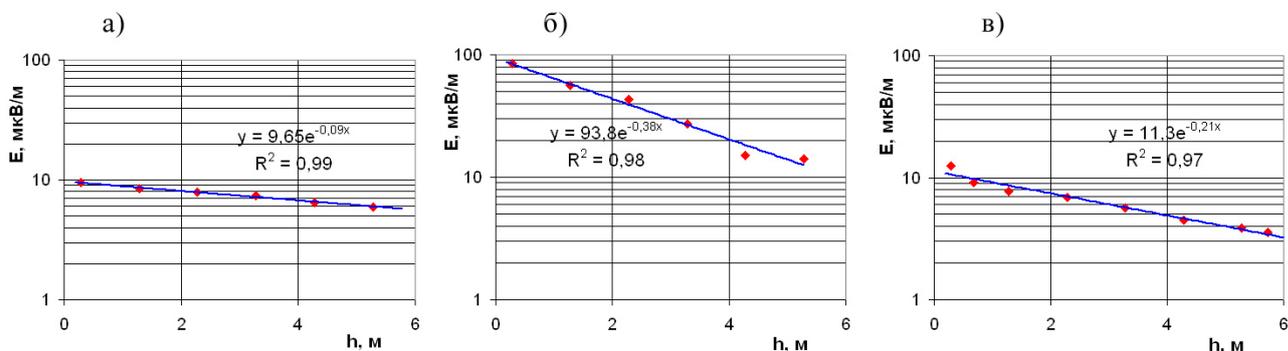


Рис. 5. Зависимость уровня поля от высоты на частотах 10 МГц (а), 12 МГц (б), 15 МГц (в). Сплошные линии – аппроксимация. Квадраты – экспериментальные данные. Расстояния от излучателя: на частоте 10 МГц – 200м; на частоте 12 МГц – 125 м; на частоте 15 МГц – 150 м.

Таким образом, на примере соленых озер показано их электродинамическое подобие со слоистой структурой «лед – море», которая в зимнее время года покрывает 25-35 млн. км<sup>2</sup> Мирового океана. Также показано, что слой льда существенно влияет на электромагнитное поле, которое на некоторых расстояниях может быть больше, чем поле над бесконечно проводящей поверхностью. В целом слоистые природные среды типа «диэлектрик на проводнике» могут служить чувствительными индикаторами и использоваться при мониторинге сейсмoeлектромагнитных и климатических процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-Сибирь № 12-02-98002 и № 12-02-98007, Интеграционного проекта СО РАН № 11 на базе стационара Горячинск.