

Электрометрический метод определения поверхностного импеданса двухслойной структуры „лед—морская вода“

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

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: idam@mail.ru

(Поступило в Редакцию 7 апреля 2015 г. В окончательной редакции 30 июня 2015 г.)

Предложен электрометрический метод определения поверхностного импеданса двухслойной структуры „лед—морская вода“. Метод заключается в определении комплексной величины поверхностного импеданса (модуля и фазы) структуры „лед—морская вода“ в очень низкочастотном—низкочастотном—среднечастотном (ОНЧ—НЧ—СЧ) диапазонах радиоволн по результатам не радиоволновых, а электрометрических измерений. Для структуры „лед—морская вода“ достаточно измерить электропроводность пробы воды σ_w и толщину льда h_i по данным бурения.

В задачах распространения радиоволн вдоль земной поверхности основным параметром, характеризующим электрические свойства нижней стенки волновода „Земля—ионосфера“, является поверхностный импеданс δ , учитывающий совокупное воздействие слоистой Земли на электромагнитное поле. Учет влияния подстилающей среды на распространение радиоволн основан на понятии приведенного поверхностного импеданса вертикально поляризованной электромагнитной волны на поверхности горизонтально-слоистой структуры: $\delta = E_\tau / (H_\tau \cdot Z_0)$, где E_τ , H_τ — горизонтальные составляющие электрического и магнитного полей на границе раздела „воздух—Земля“, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$ — характеристический импеданс свободного пространства (вакуума).

Интересными с точки зрения электрических свойств слоистой подстилающей среды представляются структуры типа „лед—морская вода“. В Сибири с суровыми климатическими условиями такие структуры образуются и существуют более полугода. Здесь имеется большое количество как пресных, так и соленых озер различной площади, последние из которых могут быть использованы также как аналоги структуры „лед—море“ в Арктическом бассейне. Следует отметить, что в настоящее время, хотя и имеются некоторые работы по изучению ледовых покровов как индикаторов климатических и физико-механических воздействий по их электромагнитным параметрам, данная задача еще практически не исследована.

Известно [1,2], что двухслойные структуры типа „изолятор на проводнике“ и „проводник на изоляторе“ с сильно контрастными величинами удельного электрического сопротивления ρ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ позволяют изменять импеданс от сильно-индуктивных до сильно-емкостных значений ($-90^\circ < \varphi_\delta < +90^\circ$). В классе природных слоистых сред примером сильно-индуктивной структуры является двухслойная среда „лед—морская вода“, занимающая значительные площади Мирового океана. Шельфовые

ледники Антарктиды толщиной 100–350 м и площадью в сотни тысяч квадратных километров также дают сильно-индуктивные импедансы в сверх-низкочастотном (СНЧ — 30–300 Hz) и ОНЧ-диапазонах. Значения фазы импеданса φ_δ достигают -89° и являются практически предельными для природных слоистых сред [3].

При исследованиях электрических свойств подстилающей слоистой среды, проводимых применительно к задачам распространения радиоволн над реальными слоисто-неоднородными средами, широкое применение находит радиоволновой метод радиоимпедансного зондирования (РИЗ) [4,5]. Сущность радиоволнового метода состоит в том, что производится измерение тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей E_τ и H_τ ОНЧ—НЧ—СЧ-радиостанций на границе раздела „воздух—подстилающая среда“ и определяются значения модуля $|\delta|$ и фазы φ_δ приведенного поверхностного импеданса. Недостатком метода РИЗ является то, что он определяет поверхностный импеданс подстилающей среды с использованием полей действующих ОНЧ—НЧ—СЧ-радиостанций. В районах Арктики и Антарктики сеть действующих радиостанций очень редка (в основном радиомаяки) и уровни измеряемого E_τ и H_τ электромагнитного поля соизмеримы с уровнем естественных радиопомех, что не позволяет точно измерить величину поверхностного импеданса.

На основе теории распространения радиоволн [1] нами предложен новый электрометрический метод определения поверхностного импеданса слоистой структуры „лед—морская вода“ на любой частоте в ОНЧ—НЧ—СЧ-диапазонах радиоволн на основе не радиоволновых методов. Новизна предлагаемого метода определения поверхностного импеданса слоистой структуры „лед—морская вода“ заключается в измерении электропроводности пробы соленой воды σ_w и толщины слоя льда h_i по данным бурения и последующем расчете поверхностного импеданса δ слоистой структуры

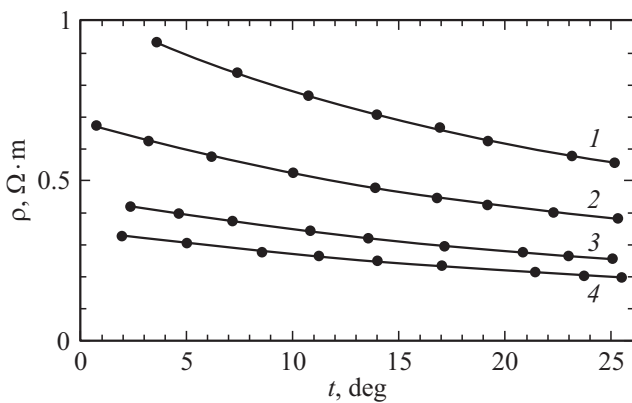


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления ρ вод озера Сульфатное (1), Черного (2), Желтого (3) и Средиземного (4) морей.

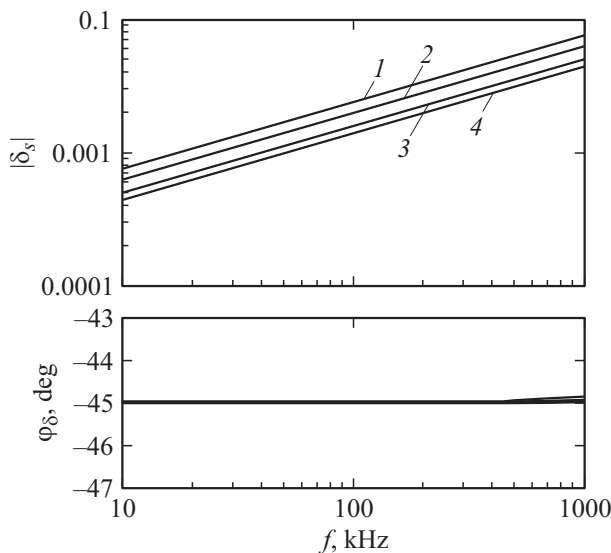


Рис. 2. Частотные зависимости $|\delta_s|$ и φ_δ для озера Сульфатное (1), Черного (2), Желтого (3) и Средиземного (4) морей.

„лед–соленая (морская) вода“ по формуле

$$\delta = \delta_s - i(2\pi/\lambda)h_i, \tag{1}$$

где

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_w + 1)^2 + (60\lambda\sigma_w)^2}} \exp\left(-i \arctg \frac{60\lambda\sigma_w}{\epsilon_w + 1}\right). \tag{2}$$

Здесь δ_s — поверхностный импеданс моря, ϵ_w — относительная диэлектрическая проницаемость морской воды, $\epsilon_w = 87$ при температуре воды $0.2-1^\circ\text{C}$, λ — длина электромагнитной волны, m .

На рис. 1 для примера представлены температурные зависимости удельного электрического сопротивления ρ ($\rho = 1/\delta$ — величина, обратная электропроводности воды) для вод Черного, Желтого и Средиземного морей

и соленого озера Сульфатное в Селенгинском районе Республики Бурятия по результатам собственных измерений литровых проб воды [3].

По формуле (1) рассчитаны частотные зависимости $|\delta_s|$ и φ_δ в диапазоне $10-1000\text{ kHz}$ для представленных на рис. 1 морей и соленого озера (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты расчетов частотных зависимостей мнимой аддитивной добавки $i(2\pi/\lambda)h_i = i(2\pi/300)f [\text{MHz}] \cdot h_i [\text{m}]$ для толщин льда h_i 0.5, 1, 2, 3 и 4 м.

Практический результат определения комплексной величины поверхностного импеданса достигается благодаря следующему из теории электромагнитных волн в слоистых средах [1] свойству двухслойной структуры „диэлектрик на проводнике“, согласно которому из-за наличия тонкого плохопроводящего слоя на сильно проводящей среде в поверхностном импедансе двухслойной среды появляется аддитивная к импедансу проводника (морской воды) δ_w добавка $i(2\pi/\lambda)h_i$, линейно зависящая от толщины слоя диэлектрика (льда) и смещающая фазу импеданса в сильно-индуктивную область. При выводе рабочих формул использованы соотношения для поверхностного импеданса двухслойной среды для плоской вертикально поляризованной электромагнитной волны [1].

Методика определения поверхностного импеданса слоистой структуры „лед–соленая вода“ заключается в следующем: 1) на слоистой структуре „лед–соленая вода“ с помощью ручного или бензоэлектрического ледобура проводится бурение слоя льда на всю толщину до воды, 2) с помощью измерителя толщины льда, аналогичного штангенциркулю, определяется толщина слоя льда в метрах (с точностью $0.5-1\text{ cm}$), 3) с помощью сеточной ложки очищают отверстие во льду от остатков льда и снега и погружают сосуд объемом $(0.5-1)L$ на всю толщину слоя льда для взятия пробы воды, 4) взятую пробу соленой воды переливают в стеклянную или пластмассовую емкость объемом около $0.5L$, 5) кон-

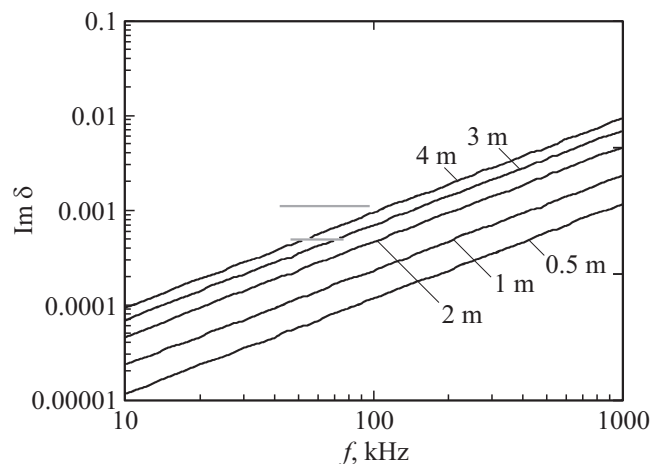


Рис. 3. Частотные зависимости мнимой аддитивной добавки поверхностного импеданса для толщин льда от 0.5 до 4 м.

Таблица 1. Результаты измерений поверхностного импеданса

f, kHz	22.2	50	180	279
$ \delta $	0.0016	0.0025	0.0062	0.0086
φ_0, deg	-60	-58	-64	-70

Таблица 2. Результаты расчетов поверхностного импеданса и измерения толщины льда и электропроводности соленой воды

h_i, m	$\sigma_w, \text{S/m}$	f, kHz	22.2	50	180	279
1.01	0.9	$ \delta $	0.00154	0.0026	0.0066	0.00915
		φ_0, deg	-57.3	-61	-66	66.9

дуктометром (например, типа Aquameter) определяют электропроводность σ_w пробы соленой воды, а также ее температуру и минерализацию, б) полученные величины σ_w и h_i подставляют в формулы (1) и (2) для расчетов поверхностного импеданса, задав ϵ_w и длину волны λ (или частоту f), 7) полученные значения модуля и фазы поверхностного импеданса используют для расчетов распространения ОНЧ–НЧ–СЧ-радиоволн над структурой „лед–соленая вода“.

Проверка электрометрического метода определения поверхностного импеданса слоистой структуры „лед–соленая вода“ проведена в зимний период на соленом озере Сульфатное. Методика сравнительных измерений заключалась в следующем: 1) проводились непосредственные измерения модуля и фазы поверхностного импеданса методом РИЗ с использованием полей радиостанций 22.2, 50, 180 и 279 kHz, 2) проводились бурение льда ледобуром „Gifry-30“, определение толщины льда h_i и электропроводности σ_w пробы соленой воды. По измеренным величинам h_i и σ_w определялся поверхностный импеданс на рабочих частотах 22.2, 50, 180 и 279 kHz ($\lambda = 13\,500, 6000, 1666, 1067 \text{ m}$).

В табл. 1 приведены результаты измерений поверхностного импеданса методом РИЗ [4,5].

Из табл. 1 следует, что фаза поверхностного импеданса на всех частотах попадает в сильно-индуктивную область. В табл. 2 приведены результаты измерения толщины льда h_i и электропроводности σ_w пробы воды при температуре 0.2–1 deg, а также результаты расчетов по формуле (1) поверхностного импеданса δ на четырех частотах действующих радиостанций.

Сравнение измеренных методом РИЗ и рассчитанных предложенным электрометрическим методом значений поверхностного импеданса показало их хорошую сходимость. Погрешность измерений не превышает 7% по модулю и 3 deg по фазе поверхностного импеданса, что вполне допустимо при прогнозировании распространения ОНЧ–НЧ–СЧ-радиоволн [3].

Заключение

Предложенный электрометрический метод определения поверхностного импеданса слоистой структуры „лед–морская вода“ позволяет определить поверхностный импеданс на любой частоте ОНЧ–НЧ–СЧ-диапазонов (10–1000 kHz) по результатам не радиоволновых измерений. Этот метод может быть использован при составлении карт геоэлектрического разреза различных типов ледового покрова, необходимых для проектирования радиолиний связи и навигации над двухслойной структурой „лед–морская вода“ [6–9] в Арктическом и Антарктическом бассейнах.

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

Список литературы

- [1] Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991.
- [2] Wait J.R. Electromagnetic waves in stratified media. Oxford–Paris: Pergamon Press. 1962.
- [3] Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996.
- [4] Авт.св. № 296059 (СССР) Вешев А.В., Егоров В.А., Ивочкин В.Г., Пертель М.И. Способ определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости // Бюл. гос. комитета СССР по делам изобр. и откр. „Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки“. 1971. № 8. С. 141–142.
- [5] Парфентьев П.А., Пертель М.И. Низкочастотный волновод „Земля–ионосфера“, Алма-Ата: изд-во Гылым, 1991. С. 133–135.
- [6] Нагулаева И.Б., Башкуев Ю.Б. Электромагнитная диагностика неоднородных сред сейсмоактивной области. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co Germany, 2012.
- [7] Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Ангархаева Л.Х. // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. 2014. № 4 (16). С. 151–156.
- [8] Башкуев Ю.Б., Буянова Д.Г., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Ангархаева Л.Х., Нагулаева И.Б. // Вестник Бурятского научного центра СО РАН. 2014. № 4 (16). С. 166–180.
- [9] Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Ангархаева Л.Х., Нагулаева И.Б., Хаптанов В.Б., Буянова Д.Г. VIII Всероссийская научно-техническая конференция „Радиолокация и радиосвязь“, 24–26 ноября 2014. Москва: Доклады. Издание JRE-ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2014. С. 200–204.