

Выбор феноменологической модели диэлектрической проницаемости жидкого полиэлектролита для решения задач дистанционного зондирования акваторий

И.Н. Садовский¹, Д.С. Сазонов¹

¹Институт космических исследований РАН, 117997, г. Москва, Профсоюзная 84/32, E-mail: Илья_Nik_Sad@mail.ru

Основной целью данной работы являлся анализ общепринятых моделей диэлектрической проницаемости (ДП) водной среды и их сравнение с данными высокоточных экспериментальных измерений для определения модели ДП, адекватно описывающей поведение водного раствора NaCl под воздействием электромагнитного СВЧ излучения. Лабораторные измерения охватывают диапазон термодинамических температур раствора от -2,15 до 79,85°C и значений солености от 0 до 200‰. При выполнении модельных расчетов были использованы 6 моделей диэлектрической проницаемости жидкого электролита, опубликованные в разное время в научно-периодической литературе. Анализ выполнен для четырех фиксированных значений частот 9,5, 35,5, 48,87 и 75,5 ГГц.

The main purpose of this work was the analysis of the standard models of the dielectric permittivity (DP) of the water environment and their comparison with data of high-precision experimental measurements, for definition of the DP model which is adequately describing behavior of aqueous solution NaCl under the influence of the electromagnetic microwave radiation. Laboratory measurements covered the range of thermodynamic temperatures of solution from -2,15 to 79,85°C and values of salinity from 0 to 200 ‰. During model calculations the 6 models of dielectric permittivity of the liquid electrolyte, published at different times in scientific-periodic literature were used. The analysis was made for four fixed values of frequencies of 9,5, 35,5, 48,87 and 75,5 GHz.

Эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли со спутников во многом определяется наличием адекватных моделей, связывающих характеристики измеряемых приборами радиосигналов с параметрами подстилающей поверхности. Одной из наиболее актуальных проблем является разработка высокоточной релаксационной модели диэлектрических свойств жидкого электролита, т.к. практически во всех задачах дистанционного зондирования данная модель выступает в качестве фундаментальной основы проводимых модельных расчетов. Следует отметить, что сделанное замечание относится не только к задачам дистанционного изучения акваторий, но и атмосферы и поверхности суши, где даже небольшое содержание влаги (в различных состояниях) в значительной степени влияют на их отражательные характеристики. Говоря о радиополяриметрических измерениях, необходимо обратить внимание на следующий факт. Потенциальная чувствительность современных бортовых радиометрических приемников находится на уровне 0,05 К и менее. При этом, в зависимости от состояния (в первую очередь, речь идет о термодинамической температуре и концентрации солей) водной среды, предсказания существующих моделей диэлектрической проницаемости расходятся на величину более 5%, обеспечивая вариации радиояркостной температуры в 2К и более, в зависимости от выбранной частоты микроволнового диапазона. Таким образом, точность восстановления параметров исследуемых объектов напрямую зависит от качества задействованной модели диэлектрической проницаемости водной среды.

Общепринятой теорией релаксационных потерь однородных жидких диэлектриков является теория Дебая. Рассматривая молекулы жидкости в виде шарообразных структур обладающих одинаковыми временами жизни и постоянными дипольными моментами, а так же вращающихся под действием электрического поля в вязкой среде, он получил общеизвестное выражение для значения диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где, ε_S - значение диэлектрической проницаемости на низких частотах,

ε_{∞} - "оптическая" диэлектрическая проницаемость,

ε_0 - диэлектрическая постоянная, равная $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$,

σ - ионная проводимость,

τ - время релаксации дипольного излучения диэлектрика.

Одним из наиболее значимых модельных факторов является время релаксациит, которое зависит от температуры жидкого диэлектрика. При заданной температуре величина τ постоянна, однако при изменении температуры диэлектрика имеет место некое распределение времен релаксаций по отдельно взятым диполям, которое имеет довольно сложный вид.

Учет этого фактора был произведен Коула-Коула: рассмотрев ситуацию при наличии двух времен релаксаций и обобщая её на случай множества времен релаксации, описываемого некоторой функцией плотности вероятности, они пришли к качественно иным зависимостям диэлектрической проницаемости от частоты:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}} - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где α - некий эмпирический параметр, характеризующий распределение времен релаксаций (распределение является физически адекватным при выборе значений параметра α в пределах от нуля до 0,05).

Как видно из сравнения (1) и (2) при $\alpha = 0$, что соответствует равенству времен релаксаций, выражение (2) переходит в (1). В последнее десятилетие все большую популярность приобретает, так называемая, двухчастотная модель Дебая, представленная, например, в работах [1,2]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_L}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\varepsilon_L - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau_2} - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где: τ_1 и τ_2 - первое и второе время релаксации,

ε_L - диэлектрическая проницаемость на промежуточной (вспомогательной) частоте.

По замечанию авторов этих работ, использование соотношения (3), наилучшим образом объясняет данные спутниковых исследований, полученных, в частности, с помощью SSM/I (Specialsensormicrowave/imager). При этом, введение второго времени релаксации, не позволяет рассматривать двухчастотную модель Дебая как, некоторого рода, компромисс между моделью Дебая и Коула-Коула, поскольку, как это было отмечено в [2], пока неизвестно, какой физический процесс лежит в основе данного явления.

Для анализа, были отобраны аналитические модели ДП, представленные в Таблице 1. Следует отметить, что данный список является далеко не полным, однако в нем представлены все три типа моделей - Дебая, Коула-Коула и двухчастотная модель Дебая.

Таблица 1. Анализируемые модели ДП.

Автор(ы)	Источник	Форма записи	Условное обозначение
А.Р. Stogryn	[3]	Модель Дебая	M11
А.Р. Stogryn	[3] (с изменениями: $\varepsilon_0 = 5,0 + 0,04 * t$)	Модель Дебая	M12
А.Р. Stogryn	[4]	Модель Коула-Коула	M21
Klein A., Swift C.	[5] с изменениями[6]	Модель Коула-Коула	M22

	A.P. Stogryn, H.T. Bull, K.Rubayi and S.Iravanchy	[1]	Двухчастотная модель Дебая	M31
	Thomas Meissner and Frank J.Wentz	[2]	Двухчастотная модель Дебая	M32

В качестве опорных, в настоящей работе использовались данные сторонних экспериментальных измерений значений диэлектрической проницаемости водного раствора NaCl. Подробное описание экспериментальной установки, методик выполнения измерений и оценки их погрешностей могут быть найдены в [7]. Измерения проводились на основе экспериментального стенда отражательного типа для измерения ДП сильнопоглощающих жидкостей. Измерения были выполнены на четырех различных частотах (9,5, 35,5, 48,87 и 75,5 ГГц) и охватывали значительные диапазоны значений температур и солености. Так, в ходе измерений температура образца (водного раствора NaCl) изменялась от -2,15°C до 79,85°C, а значения солености варьировались в пределах от 0,0 до 200,0‰. В качестве примера, можно привести результаты измерений действительной и мнимой частей ДП на частоте 75,5 ГГц. (Таблицы 2 и 3).

Вполне очевидно, что результаты описываемых исследований можно считать наиболее полными из известных в литературе с точки зрения охватываемых диапазонов солености и температуры. Это позволяет одновременно сравнивать результаты модельных предсказаний, вне зависимости от границ применимости той, или иной модели ДП. Кроме этого, оказывается возможность оценить адекватность моделей при возникновении случаев их некорректного использования. Последний аспект особенно важен при решении обратных задач, когда результат заведомо неизвестен и, в общем-то говоря, может быть далек от пределов применимости задействованной модели.

Таблица 2. Значения ϵ' , измеренные для системы вода – NaCl на частоте 75,5 ГГц.

Т, К	Соленость, ‰											
	0	2	5	12	18	36	50	70	100	140	180	200
271	-	-	-	-	-	6.23	6.48	6.84	7.10	7.69	8.03	8.24
273	6.03	6.07	6.11	6.03	6.17	-	-	-	-	-	-	-
283	6.83	6.95	6.98	7.04	6.92	7.11	7.42	7.72	7.87	8.41	8.71	8.90
293	7.99	8.11	8.16		8.06	8.30	8.51	8.80	8.93	9.31	9.54	9.62
303	9.66	9.70	9.79	9.73	9.32	9.48	9.84	10.14	10.29	10.34	10.50	10.53
313	11.86	11.77	11.80	11.79	11.28	11.17	11.19	11.69	11.74	11.64	11.76	11.57
323	14.17	14.33	14.35	14.34	13.65	13.53	13.81	13.55	13.45	12.94	12.91	12.62
333	17.70	17.75	17.65	17.36	16.37	16.59	16.47	15.76	15.45	14.54	14.39	13.78
343	20.51	20.54	20.21	20.46	19.20	18.70	18.80	17.85	17.01	16.01	15.64	14.81
353	23.91	23.90	23.01	23.54	22.02	21.02	20.85	19.97	18.56	17.39	16.56	15.57

Таблица 3. Значения ϵ'' , измеренные для системы вода – NaCl на частоте 75,5 ГГц.

Т, К	Соленость, ‰											
	0	2	5	12	18	36	50	70	100	140	180	200
271	-	-	-	-	-	9.50	9.59	9.83	10.07	9.94	9.74	9.66
273	9.47	9.36	9.38	9.01	9.78	-	-	-	-	-	-	-
283	11.98	11.87	11.84	11.90	12.25	12.43	12.55	12.86	12.77	12.63	12.13	12.05
293	14.72	14.48	14.34		14.95	15.20	14.99	15.26	15.16	14.71	14.11	14.03
303	17.76	17.49	17.23	17.43	17.61	17.68	17.54	17.52	17.46	17.08	16.25	16.05
313	20.96	20.50	20.19	20.18	20.42	20.37	21.37	20.29	19.92	19.18	18.50	18.16
323	23.55	23.24	22.81	22.96	23.47	23.55	22.97	22.80	22.35	21.59	20.44	20.14
333	26.18	25.95	25.56	25.40	26.18	25.73	25.68	25.26	24.75	23.73	22.93	22.26
343	28.91	28.48	27.67	28.29	27.98	27.96	27.70	27.51	26.47	25.99	24.42	23.75
353	31.35	30.27	29.50	29.80	30.10	29.34	29.26	29.01	28.19	27.82	25.99	25.57

Сравнения результатов модельных оценок действительной и мнимой частей ДП, выполненных в соответствии с моделями, представленными в Таблице 1, с данными лабораторных измерений соответствующих величин, осуществлялось по следующему алгоритму:

1. На первом этапе, для всего набора имеющихся экспериментальных данных, в соответствии с моделями, осуществлялся расчет соответствующих значений ϵ' и ϵ'' .

2. Далее, полученные значения использовались для определения интенсивности собственного излучения гладкой водной поверхности.

3. Аналогичная серия вычислений была проведена и для всего набора данных лабораторных измерений $\dot{\epsilon}$. Следует отметить, что если значения длины волны излучения λ , температуры T_0 и солености определялись в расчетах условиями проведения лабораторного эксперимента, то значение угла визирования θ было постоянным и составило $51,3^\circ$ (от надира).

4. На заключительном этапе осуществлялся расчет относительной разницы данных лабораторных измерений результатов модельных расчетов:

$$\Delta T_{\text{я}} = \left| \frac{T_{\text{я}}^{\text{мод}} - T_{\text{я}}^{\text{эксп}}}{T_{\text{я}}^{\text{эксп}}} \right| * 100\%. \quad (4)$$

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 1.

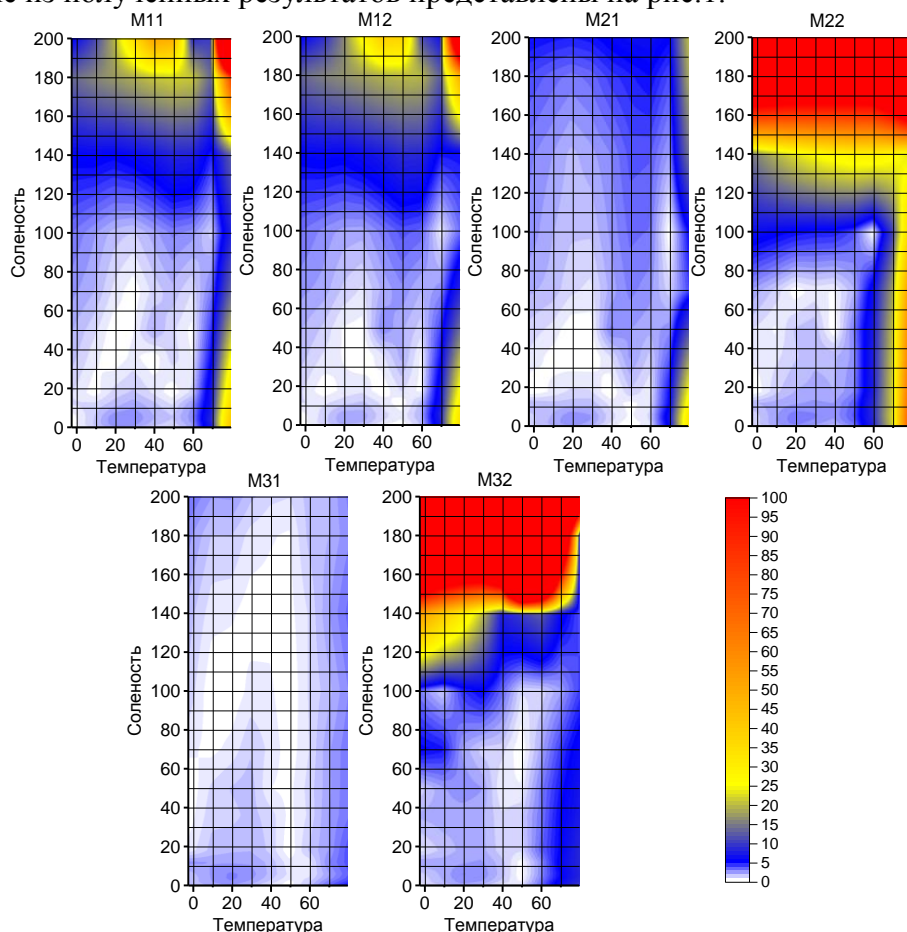


Рис. 1. Поля распределений расчетных значений $\Delta T_{\text{я}}$ на частоте 75,5 ГГц для всех анализируемых моделей. Случай вертикальной поляризации, $\theta = 53,1^\circ$.

В частности, представлены расчетные значения $\Delta T_{\text{я}}$ на частоте 75,5 ГГц. Аналогичные поля распределения $\Delta T_{\text{я}}$ были получены и для частот 9,5, 35,5 и 48,87 ГГц. Полученные результаты позволили не только определить потенциальные области применимости проанализированных моделей, но и выделить участки значений

температур и соленостей, в которых использование той, или иной модели является предпочтительным.

Помимо этого был произведен расчет средних показателей величины $\Delta T_{\text{я}}$ (для каждой из анализируемых моделей на четырех частотах) для области, ограниченной значениями: $10^{\circ}\text{C} < T_0 < 25^{\circ}\text{C}$, $16\text{‰} < S < 18\text{‰}$. Следует отметить, что выделенные значения температуры и солености являются преобладающими для акватории Черного моря (в летне-осенний период), где располагаются основные полигоны проведения подспутниковых экспериментов.

Результаты расчетов показали, что при обработке данных радиометрических наблюдений (при выполнении условий $10^{\circ}\text{C} < T_0 < 25^{\circ}\text{C}$, $16\text{‰} < S < 18\text{‰}$), целесообразно соблюдать следующие рекомендации:

- на частотах 9,5 и 48,87 ГГц - использовать модель диэлектрической проницаемости M32 (среднее значение ошибки $\Delta T_{\text{я}} = 0,23\%$);
- на частоте 35,5 ГГц - использовать модель M21 (среднее значение ошибки $\Delta T_{\text{я}} = 1,15\%$),
- а на частоте 75,5 ГГц - использовать соотношения модели M12 (среднее значение ошибки $\Delta T_{\text{я}} = 0,63\%$).

Малая величина представленных усредненных значений параметра $\Delta T_{\text{я}}$, однако, не снижает актуальность вопроса необходимости разработки новой модели диэлектрической проницаемости. Во-первых, как можно увидеть на рис.1, ни одна из рассмотренных моделей не может объяснить результаты высокоточных лабораторных измерений. Во-вторых, многие из рекомендованных моделей имеют ограниченные области применимости, что сопровождается резким возрастанием величины $\Delta T_{\text{я}}$ (более 100%), при выходе за их пределы. В-третьих, использование параметра оценки $\Delta T_{\text{я}}$, хоть и имеет практическое объяснение в рамках представленной работы, значительно нивелирует расхождения модельных и измеренных лабораторно значений $\dot{\epsilon}$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №11-05-00493-а и гранта Президента РФ № МК-865.2012.5.

Литература

1. A.P. Stogryn, H.T. Bull, K.Rubayi and S.Iravanchy. The microwave dielectric properties of sea and fresh water. GenCorp Aerojet, Azusa, Calif., 1995.
2. Thomas Meissner and Frank J.Wentz . The Complex Dielectric Constant of Pure and Sea Water from Microwave Satellite Observations. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 42, No. 9, September 2004, pp.1836-1849.
3. Митник Л.М. Физические основы дистанционного зондирования окружающей среды//Учебное пособие. ЛПИ, 1977.
4. Stogrin A. Equations for calculating the dielectric constant for saline water//IEEE Trans. Micr. Teor. Techn. - 1971.-V.19, N8. - P. 733-736.
5. Klein A., Swift C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 1977. V. 25. N° 1. P. 104–111.
6. Александров Д.В. Верификация СВЧ-моделей диэлектрической проницаемости воды по данным угловых измерений собственного радиоизлучения в миллиметровом диапазоне длин волн: Препринт. М.: ИКИ РАН, 2002. Пр-2066. 36 с.
7. Ашеко А.А., Гордиенко В.Г., Стрельцина А.К., Шарков Е.А. Диэлектрические свойства водных электролитных систем. II. Частота 35.5 ГГц. Вестник ХНУ, Серия физическая «Ядра, частицы, поля», №496, вып. 4(12), 2000, с.58-62.