

УДК 537.874

DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-58-65

Георгий Степанович Бордонский,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
(672014, Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16а),
e-mail: lgc255@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-0009-0822

Методика измерений действительной части относительной диэлектрической проницаемости переохлаждённой воды в микроволновом диапазоне

Диэлектрические характеристики переохлаждённой воды требуются для решения задач микроволнового дистанционного зондирования природной среды. В настоящее время отсутствуют измерения действительной части относительной диэлектрической проницаемости для температур ниже $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. В работе предложена методика измерений действительной части относительной диэлектрической проницаемости с использованием волноводных резонаторов. В резонатор помещают дисперсную увлажнённую среду с порами нанометровых размеров для достижения глубокого переохлаждения воды. Для устранения влияния неоднородностей среды, вызванной миграцией влаги при её замерзании и проявлении искажений резонансных кривых, предлагается использовать волноводные резонаторы повышенных размеров. При этом из-за усреднения свойств среды по объёму происходит сглаживание осцилляций на резонансных кривых пропускания резонатора и значительно уменьшается влияние неоднородностей на результаты определения параметров резонанса. В выполненном эксперименте использован прямоугольный резонатор с длиной, равной длине волны в волноводе, соответствующего сечения. По сравнению с полуволновым резонатором удалось получить существенно более правильную форму резонансной кривой и определить сдвиг резонансной частоты при понижении температуры влажной среды. Рассмотрены возможные ошибки восстановления диэлектрических характеристик переохлаждённой воды, которые следует учитывать при измерениях. Предполагается достижение точности измерений действительной части диэлектрической проницаемости порядка десяти процентов в сантиметровом диапазоне длин волн при температурах от -20 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: переохлаждённая вода, диэлектрическая проницаемость, микроволновый диапазон, нанопористая среда, резонаторные измерения

Введение. Знание диэлектрической проницаемости переохлаждённой воды для микроволнового диапазона представляет значительный интерес для изучения атмосферных образований, для коррекции переноса излучения в задачах спутникового мониторинга и для определения характеристик мёрзлых земных покровов [5; 8; 10].

Однако измерения комплексной относительной диэлектрической проницаемости (ϵ), особенно при температуре (T) ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, представляет сложную задачу [12]. В работе [9] её решили с использованием микроэмульсии воды, где удалось охладить

образцы до $-18\text{ }^\circ\text{C}$ и выполнить измерения действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей ϵ на частоте 9,6 ГГц.

В работах [1; 2] эту проблему решали с использованием увлажнённых нанопористых силикатов, в которых воду можно переохладить до $-90\text{ }^\circ\text{C}$ [4]. В этих работах были найдены зависимости ϵ'' от T и частоты (f). В случае использования нанопористых сред для глубокого переохлаждения воды возникли трудности в определении ϵ из-за возникновения в образцах проводящих кластеров, которые сильно усложняют восстановление ϵ [3].

Устранить влияние неоднородностей и возникающую при этом пространственную дисперсию в среде удалось путём значительно понижения весовой влажности и усреднением зондирующих сигналов по объёму исследуемых образцов [1; 2]. Однако в этих работах были найдены только зависимости ϵ'' от f и температуры.

Цель настоящей работы заключалась в разработке методики измерений ϵ' в микроволновом диапазоне с использованием резонаторов. Резонансная частота чувствительна к малым изменениям свойств среды, что позволяет проводить температурные измерения слабо увлажнённых образцов. При этом необходимо решить вопрос о нивелировании эффектов пространственной дисперсии среды, т. е. искажений резонансной кривой.

Методика измерений. Как было установлено в [6] измерение ϵ' в полуволновом прямоугольном резонаторе не позволяет достаточно точно определять изменение ϵ' увлажнённой дисперсной среды от температуры из-за сильных искажений резонансной кривой пропускания резонатора.

Для того, чтобы устранить это явление, предлагается модификация резонаторного метода измерения ϵ на более высоких видах колебаний, что позволяет увеличить объём среды и выполнить усреднение по большему числу макроскопических неоднородностей.

Резонансные частоты прямоугольного резонатора для среды без потерь представляются следующей формулой [7]:

$$f_{mnp} = \left(c \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2}} \right) / (2\sqrt{\epsilon'}),$$

где $m, n, p = 0, 1, 2, \dots$, a, b, l – размеры резонатора вдоль осей, c – скорость электромагнитных волн в вакууме.

Для волн типа H_{10} в прямоугольном волноводе и распространения излучения вдоль оси z часто используют резонаторы с типом колебаний H_{10p} , где $p = 1, 2, 3 \dots$. В предлагаемой методике необходимо использовать виды колебаний для $p > 1$, т. е. H_{102} , H_{103} и т. д.

Проверка предлагаемой методики. Определение ϵ' среды при полном заполнении резонатора осуществляется по изменениям резонансной частоты резонатора со средой и f_0 – резонатора без среды. Из ширины резонансной кривой находят ϵ'' .

В выполненном эксперименте первоначально был исследован резонатор с размерами $a = 23$ мм, $b = 10$ мм, $l = 10$ мм. Диафрагмы с круглыми отверстиями связи диаметром 6 мм устанавливали в плоскости x, y , где сечение подводящих волноводов равнялось 23×10 мм². Этому резонатору соответствуют значения $m = 1, n = 0$ и в нём могут наблюдаться виды колебаний для $p = 1, 2, 3 \dots$, т. е.

$$f_{10p} = \left(c \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{p^2}{l^2}} \right) / (2\sqrt{\varepsilon'}).$$

Для иллюстрации влияния неоднородностей на рис. 1 приведены формы резонансной кривой данного полуволнового резонатора, для которого $l = \lambda_W/2$ ($l = 10$ мм, $p = 1$, λ_W – длина волны в волноводе сечением 23×10 мм²). Резонатор был заполнен силикагелем марки Асгос-60 (силикагель для хроматографии со средним размером пор 6 нм) с весовой влажностью 14 %. Резонансная частота пустого резонатора 12,0 ГГц. Как следует из графиков рис. 1, наблюдается неравномерность в полосе пропускания с отсутствием чётко выраженного максимума, что делает практически невозможным определение резонансной частоты и ширины пропускания мощности (P) резонатора по уровню -3 дБ от максимума.

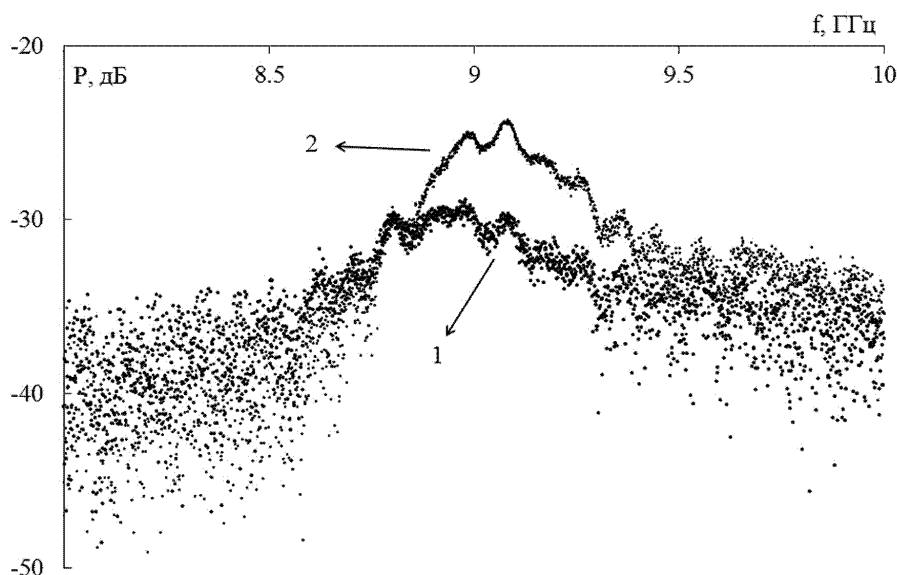


Рис. 1. Резонансные кривые полуволнового прямоугольного резонатора с увлажнённым силикагелем для двух температур: -30 °C (1) и -60 °C (2)

Fig. 1. Resonance curves of a half-wave rectangular resonator with moistened silica gel for two temperatures: -30 °C (1) and -60 °C (2)

Для увеличения объёма резонатора следует выбрать l , на которой укладывается большее число полуволн. На рис. 2 приведены контрольные зависимости пропускания мощности излучения для пустого резонатора с $l = 2(\lambda_W/2)$. Мощность проходящего излучения представлена в логарифмических единицах (децибелах). Наблюдается два низших резонанса для $p = 1, 2$ вблизи 7,5 ГГц и 11,2 ГГц. Резонансы для $p = 3$ и выше искажены из-за появления высших видов колебаний в резонаторе, определяемых более высокими значениями m и n .

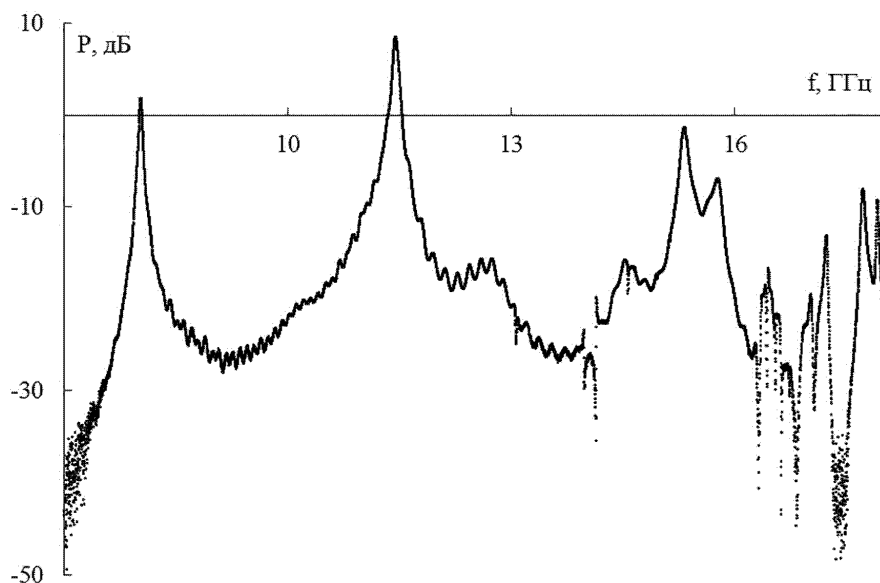


Рис. 2. Резонансные кривые для пустого резонатора с размером $l = 20$ мм

Fig. 2. Resonance curves for an empty resonator with a size of $l = 20$ mm

При заполнении резонатора увлажнённой средой с наноразмерными порами кривые пропускания приобретают следующий вид (рис. 3). При этом резонанс с $p = 1$ сдвигается в низкочастотную область, где излучение не распространяется в используемом сечении волновода, т. к. он становится запредельным. Резонанс вблизи 9 ГГц соответствует $p = 2$. Для $p = 3$ выделить резонанс затруднительно из-за наложения высших резонансов и они практически не наблюдаемы.

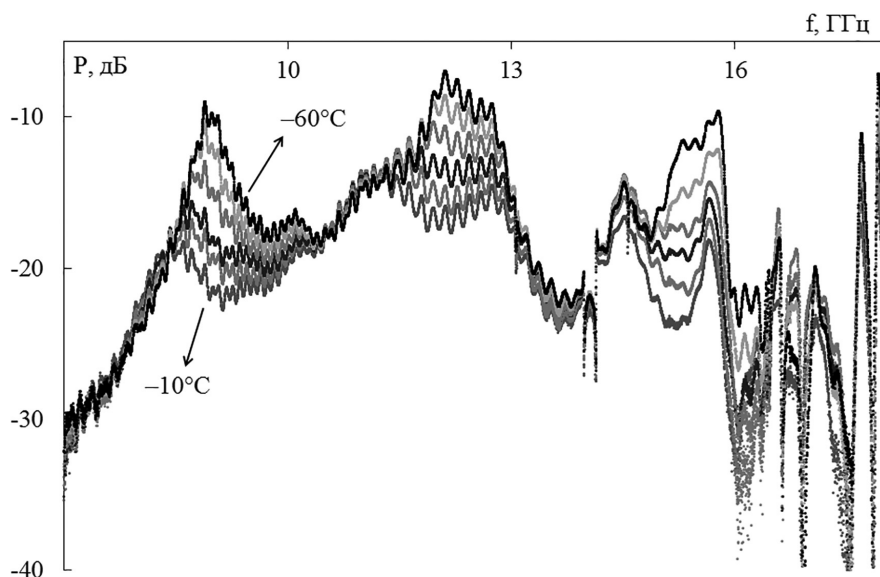


Рис. 3. График зависимости мощности пропускания от частоты для силикагеля марки КСКГ с весовой влажностью 3 % для различных температур среды от -10 до -60 °С, через каждые 10 °С

Fig. 3. Graph of transmission power versus frequency for silica gel SG05 with a weight humidity of 3 % for various ambient temperatures from -10 °С to -60 °С, every 10 °С

Резонанс с $p = 2$ при использовании процедуры сглаживания небольших осцилляций на кривых позволяет определить значение резонансной частоты. На рис. 4 приведены результаты такой процедуры для температуры $-40\text{ }^\circ\text{C}$, $-50\text{ }^\circ\text{C}$ и $-60\text{ }^\circ\text{C}$. Графики нормированы на единицу для резонансной кривой при $-60\text{ }^\circ\text{C}$.

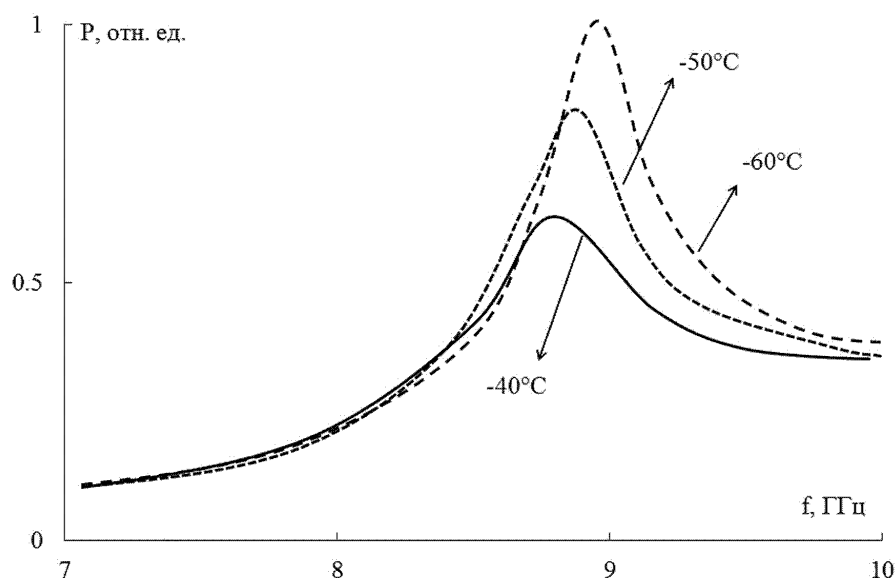


Рис. 4. Усреднённые резонансные кривые для вида колебаний H_{102} , соответствующие представленным на рис. 3. Мощность в относительных единицах

Fig. 4. Averaged resonance curves for the mode of oscillations H_{102} , corresponding to those shown in Fig. 3. Power in relative units

Как следует из графиков рис. 4, возможно определение резонансных частот с точностью ~ 10 МГц. Общий сдвиг резонансных частот при охлаждении силикагеля КСКГ влажностью 3 % составил приблизительно 400 МГц, т. е. имеется возможность определения ϵ' среды с точностью ~ 2 %. Однако на ошибку определения ϵ' воды влияют ошибки нахождения доли объёмной воды в порах. Общее содержание воды определяли термостатно-весовым способом. Часть воды находится в связанном состоянии и её свойства зависят от размеров пор и степени увлажнения среды [6].

Следует также учитывать, что при понижении температуры объёмная вода постепенно вымерзает, поэтому при температурах ниже $-40\text{ }^\circ\text{C}$ требуется учитывать и этот эффект. Как было показано в [2], для используемого материала и низком увлажнении полное замерзание имеет место приблизительно при $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, в случае высоких потерь в среде (что имеет место для температур $-10 \dots -30\text{ }^\circ\text{C}$) необходимо учитывать их влияние на частоту резонанса. Это влияние можно определить из измерений ширины резонансной кривой с последующей коррекцией значений ϵ' . Предполагается дальнейшее исследование данных вопросов.

Выводы.

1. Предложена методика измерений действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости переохлаждённой воды в микроволновом диапазоне для температур ниже $-10\text{ }^\circ\text{C}$ с использованием резонаторов. Она основана на глубоком переохлаждении воды в нанопористых силикатах. В этой методике для

усреднения влияния неоднородностей в среде, возникающих из-за появления проводящих кластеров, определяемых миграцией влаги в среде при её замораживании, измерения проводят в резонаторах с относительно большим объёмом.

2. Для проверки методики выполнен эксперимент с использованием прямоугольного резонатора, длина которого равна длине волны излучения в волноводе. Полученные результаты показали возможность определения параметров резонансных кривых для последующего вычисления действительной части относительной диэлектрической проницаемости глубоко переохлаждённой воды.

3. По предлагаемой методике может достигаться точность измерений ε' среды в волноводном резонаторе порядка 1 %. Однако реальная точность определяется точностью определения объёма воды, имеющей свойства свободной воды. Эта величина зависит от ряда параметров: доли связанной воды, доли не вымерзающей воды при понижении температуры образца, точности определения резонансной частоты, значения поглощения в среде и некоторых других параметров. Поэтому ожидаемая точность определения значения диэлектрической проницаемости составляет десятки процентов. Такая точность является достаточной для построения приближённых моделей диэлектрической проницаемости переохлаждённой воды ниже $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. к. в настоящее время сведения о измеренной ε' в научной литературе отсутствуют.

Список литературы

1. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Крылов С. Д. Изучение фактора потерь переохлаждённой поровой воды на частотах 60...140 ГГц // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 4. С. 350–355.
2. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Хапин Ю. Б. Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлаждённой объёмной воды в интервале температур 0...–90 °С на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 255–270.
3. Бордонский Г. С., Филиппова Т. Г. Влияние перколяции на диэлектрические свойства мёрзлых дисперсных сред // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4, № 1. С. 21–26.
4. Гурулев А. А. Резонаторные исследования пресного льда на частоте 3.3 ГГц // Учёные записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета им. Н.Г. Чернышевского. 2009. № 2. С. 131–133.
5. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
6. Орлов А. О. Микроволновые свойства переохлаждённой поровой воды на частотах 11 ÷ 140 ГГц: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. М., 2017. 164 с.
7. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973. 480 с.
8. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
9. Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G. The dielectric relaxation time of supercooled water // J. Chem. Phys. 1982. Vol. 76, is. 6. P. 3285–3290.
10. Ellison W. J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C // J. Chem. Phys. Ref. Data. 2007. Vol. 36, No. 1. P. 1–18.
11. Limmer D. T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores // J. Chem. Phys. 2012. Vol. 137, is. 4. P. 1841–1844.

12. Rosenkranz P. W. A Model for the complex dielectric constant of supercooled liquid water at microwave frequencies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53, is. 3. P. 1387–1393.

Статья поступила в редакцию 12.04.2019; принята к публикации 16.05.2019

Библиографическое описание статьи

Бордонский Г. С. Методика измерений действительной части относительной диэлектрической проницаемости переохлаждённой воды в микроволновом диапазоне // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 14, № 3. С. 58–65. DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-58-65.

*Georgy S. Bordonskiy,
Doctor of Physics and Mathematics,
Chief Scientific Employee,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
(16a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia),
e-mail: lgc255@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-0009-0822*

Methods of Measuring the Real Part of Supercooled Water Relative Dielectric Constant at Microwaves

The dielectric characteristics of supercooled water are required for solving problems of microwave remote sensing of the natural environment. At present, there are no measurements of the real part of the relative dielectric constant for temperatures below -18°C . The paper proposes a method for measuring the real part of relative dielectric constant using waveguide resonators. A dispersed humidified medium with nanometer-sized pores is placed in the resonator to achieve a deep supercooling of water. To eliminate the influence of medium inhomogeneities caused by moisture migration during its freezing and manifestation of distortions of resonant curves, it is proposed to use waveguide resonators of increased sizes. In this case, due to averaging of the properties of the medium over the cavity volume, oscillation is smoothed on the resonance transmission curves of the resonator and the effect of inhomogeneities on the results of determining the resonance parameters is eliminated. In the performed experiment, a rectangular resonator with a length equal to the wavelength in the waveguide, corresponding to the cross section, was used. Compared with the half-wave resonator, it was possible to obtain significantly better form of resonant curve and determine the shift of the resonant frequency with decreasing temperature of the humid medium. Possible errors in the recovery of the dielectric characteristics of supercooled water are given, which should be taken into account in the measurements. It is supposed to achieve an accuracy of measuring the real part of the dielectric constant of about ten percent at centimeter wavelength range for temperatures from -20 to -60°C .

Keywords: supercooled water, dielectric constant, microwaves, nanoporous medium, resonator measurements

References

1. Bordonskij G. S., Orlov A. O., Krylov S. D. Izuchenie faktora poter' pereohlazhdyonnoj porovoj vody na chastotah 60...140 GGc // Radiotekhnika i elektronika. 2019. T. 64, № 4. S. 350–355.
2. Bordonskij G. S., Orlov A. O., Hapin YU. B. Koefficient zatuhaniya i dielektricheskaya pronicaemost' pereohlazhdyonnoj ob"yomnoj vody v intervale temperatur 0... – 90 °C na chastotah 11...140 GGc // Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. T. 14, № 3. S. 255–270.
3. Bordonskij G. S., Filippova T. G. Vliyanie perkolyacii na dielektricheskie svojstva myorzlyh dispersnyh sred // Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granicy. 2002. T. 4, № 1. S. 21–26.
4. Gurulev A. A. Rezonatornye issledovaniya presnogo l'da na chastote 3.3 GGc // Uchyonye zapiski Zabajkal'skogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta im. N. G. Chernyshevskogo. 2009. № 2. S. 131–133.
5. Kutuza B. G., Danilychev M. V., YAKovlev O. I. Sputnikovyy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverhnosti. M.: LENAND, 2016. 336 s.
6. Orlov A. O. Mikrovolnovyye svojstva pereohlazhdyonnoj porovoj vody na chastotah 11 ÷ 140 GGc: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.03. M., 2017. 164 s.
7. Semenov N. A. Tekhnicheskaya elektrodinamika. M.: Svyaz', 1973. 480 s.
8. Sharkov E. A. Radioteplovoe distancionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy: v 2 t. T. 1. M.: IKI RAN, 2014. 544 s.
9. Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G. The dielectric relaxation time of supercooled water // J. Chem. Phys. 1982. Vol. 76, is. 6. P. 3285–3290.
10. Ellison W. J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25 THz and the temperature range 0–100 °C // J. Chem. Phys. Ref. Data. 2007. Vol. 36, No. 1. P. 1–18.
11. Limmer D. T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores // J. Chem. Phys. 2012. Vol. 137, is. 4. P. 1841–1844.
12. Rosenkranz P. W. A Model for the complex dielectric constant of supercooled liquid water at microwave frequencies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53, is. 3. P. 1387–1393.

Received: April 12, 2019; accepted for publication May 16, 2019

Reference to article

Bordonskiy G. S. Methods of Measuring the Real Part of Supercooled Water Relative Dielectric Constant at Microwaves // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2019. Vol. 14, No. 3. PP. 58–65. DOI: 10.21209/2308-8761-2019-14-3-58-65.