

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ ХОЛОДНОГО ОБЛАЧНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЧАСТОТАХ 100–300 ГГц

© 2022 г. Г. С. Бордонский^а, *, А. О. Орлов^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

Выполнены расчеты массового коэффициента поглощения в водном аэрозоле облачных образований при температурах 0...–50 °C на частотах 100...300 ГГц. При расчетах использована двухчастотная модель Дебая для диэлектрической проницаемости, в которой частоты релаксации переохлажденной воды были получены из новых экспериментов, выполненных в сантиметровом диапазоне. Из них одна частота релаксации принимает значения 10...1 ГГц, другая – 300...20 ГГц в указанном интервале температур. Выполнено сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными других авторов до частоты 170 ГГц и температуры –30°C. Отмечен значительный разброс экспериментальных данных массового коэффициента поглощения и отсутствие удовлетворительных моделей для переохлажденной воды ниже –20°C. На основе выполненного исследования предполагается, что предложенные уточненные формулы для диэлектрической проницаемости позволяют определить массовый коэффициент поглощения до частот 200...300 ГГц.

Ключевые слова: переохлажденная вода, микроволновый диапазон, модели диэлектрической проницаемости, массовый коэффициент поглощения, водный аэрозоль

DOI: 10.31857/S0205961422020038

ВВЕДЕНИЕ

Использование в дистанционном зондировании частот 100...300 ГГц (G-диапазон) позволяет принципиально улучшить понимание процессов в облачных холодных образованиях – в граничных слоях облаков, в ледяных облаках, осадках в виде снега (Battaglia et al., 2014, Sharkov, 2003), а также улучшить пространственное разрешение пассивных систем в микроволновом диапазоне. Миллиметровые волны также интересны для спектроскопии атмосферы на линиях вращательного спектра молекул. Недавний пример – поиски следов жизни в атмосфере Венеры по линии фосфина (PH₃) на частоте 266.94 ГГц с помощью наземных радиометров (Greaves et al., 2020). Для эффективного решения такой задачи требуется знание передаточной функции земной атмосферы, вариации которой определяются содержанием водного аэрозоля.

Однако теоретические исследования переноса излучения в водном аэрозоле длительное время сдерживались отсутствием знаний о значениях комплексной диэлектрической проницаемости воды (ϵ). До недавнего времени имелось только несколько экспериментальных работ по определению ϵ при охлаждении воды до температуры не ниже –20°C (Башаринов, Кутуза, 1968, Bertolini

et al., 1982). В (Bertolini et al., 1982), например, на частоте 9.61 ГГц были измерены значения действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей относительной диэлектрической проницаемости при охлаждении воды до –18°C, при этом охлаждение капель было достигнуто с использованием микроэмульсии. Результаты этих работ использовались для разработки различных моделей диэлектрической проницаемости, которые были распространены до частот ~500 ГГц (Liebe et al., 1991, Liebe et al., 1993, Ellison, 2007, Stogryn et al., 1995, Meissner, Wentz, 2004). По общему мнению, наиболее удачные модели использовали две частоты релаксации, что позволяло достичь удовлетворительного согласия в широком температурном от –20 до +70°C и частотном от 1 до 500 ГГц интервалах. Однако ясного физического обоснования использования двухчастотной модели не существует. Предполагают, что появление второго члена в формуле для ϵ связано с молекулярным взаимодействием в среде. При разработке этих моделей и их верификации использовали различные приемы, например, в (Башаринов, Кутуза, 1974) предложены измерения отношения коэффициентов поглощения на двух частотах. Натурный эксперимент весьма трудоемок, так как требует измерений не только поглощения на некоторой

трассе, но и определение концентрации воды, температуры и отсутствия ледяных частиц, искажающих результаты измерений коэффициента поглощения.

В недавней работе (Бордонский, Орлов, 2019) были измерены коэффициенты затухания (без учета рассеяния) на нескольких частотах от 10 до 180 ГГц. Охлаждение достигалось с использованием пористых силикатных сорбентов с пораами нанометровых размеров до температуры $\sim -70^\circ\text{C}$. При использовании данных о значениях ϵ' модели (Meissner, Wentz, 2004) в (Бордонский, Орлов, 2019) были найдены значения ϵ'' в частотном интервале до 200 ГГц при глубоком переохлаждении воды. Эту метастабильную поровую воду считали, на основании ряда исследований (Cerveny et al., 2016, Меньшиков, Меньшиков, 2017), имеющей характеристики близкие к объемной воде. Вместе с тем, отсутствие измеренных значений ϵ' оставляло некоторый произвол в найденных значениях ϵ'' .

Этот недостаток был устранен в работе (Bordonskiy et al., 2020), где были выполнены измерения холодной воды, находящейся в порах силикатных сорбентов, в интервале температур $0...-70^\circ\text{C}$ на частотах 7.6 и 9.7 ГГц. Использовали метод измерений в резонаторе повышенного размера, что позволило выполнить усреднение по большему числу неоднородностей среды, вызванных миграцией влаги при охлаждении образцов (Бордонский, Орлов, 2019). Из независимо измеренных ϵ' и ϵ'' были найдены температурные зависимости двух частот релаксации в области глубокого переохлаждения воды, то есть в интервале $-20...-70^\circ\text{C}$. При этом за базовую модель диэлектрической проницаемости была принята модель из работы (Meissner, Wentz, 2004), в которой корректировались формулы для двух частот релаксации в области переохлаждения воды. В отличие от (Meissner, Wentz, 2004) в (Бордонский, Орлов, 2019) критическая температура, то есть температура замерзания воды при получении аналитических выражений из экспериментальных данных оказалась равной температуре стеклования (-130°C). Уточненная зависимость частот релаксации позволила распространить формулы для двухчастотной модели до частоты 200 ГГц, поскольку именно частоты релаксации определяют частотное поведение диэлектрической проницаемости. Сравнение результатов для ϵ'' из (Бордонский, Орлов, 2019) и новых вычислений (Bordonskiy et al., 2020) показало вполне удовлетворительное их соответствие. Однако в последней работе представлены более надежные данные об ϵ' , основанные на эксперименте, что открывает возможности расчетов переноса излучения в структурах, содержащих переохлажденную воду.

Цель настоящей работы — выполнить расчеты массового коэффициента поглощения в облачном аэрозоле на основе данных из (Bordonskiy et al., 2020) до частоты 300 ГГц при глубоком переохлаждении воды. Расчеты до более высокой частоты позволят в перспективе выполнить экспериментальную проверку справедливости формул для диэлектрической проницаемости в широкой области коротковолнового участка миллиметрового диапазона. Также рассмотрен вопрос об особенностях физики воды в области температур $+4...-70^\circ\text{C}$, которые необходимы для решения задачи переноса излучения в облачных образованиях.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ

Формулы работы (Meissner, Wentz, 2004) для ϵ для двухчастотной модели в случае химически чистой воды имеют вид:

$$\epsilon(T) = \frac{\epsilon_s(T) - \epsilon_1(T)}{1 + if/f_1(T)} + \frac{\epsilon_1(T) - \epsilon_\infty(T)}{1 + if/f_2(T)} + \epsilon_\infty(T), \quad (1)$$

$$\epsilon_s(T) = \frac{3.70886 \times 10^4 - 8.2168 \times 10^1 T}{4.21854 \times 10^2 + T}, \quad (2)$$

$$\epsilon_1(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2, \quad (3)$$

$$f_1(T) = \frac{A + T}{\alpha_3 + \alpha_4 T + \alpha_5 T^2}, \quad (4)$$

$$\epsilon_\infty(T) = \alpha_6 + \alpha_7 T, \quad (5)$$

$$f_2(T) = \frac{A + T}{\alpha_8 + \alpha_9 T + \alpha_{10} T^2}. \quad (6)$$

Здесь T — температура в градусах Цельсия, f , f_1 , f_2 — частота поля и две частоты релаксации в ГГц. Параметр A и коэффициенты $a_0...a_{10}$ определены в (Bordonskiy et al., 2020) из измерений в резонаторах на частотах 7.6...9.7 ГГц в области температур $0...-70^\circ\text{C}$. Новые значения коэффициентов приведены в таблице 1. $A = 130$. Их значения приведены без указания размерности.

Возникает вопрос — почему f_1 и f_2 испытывают немонотонные изменения в области температур от -70 до 100°C . Для решения этого вопроса можно рассмотреть зависимости f_1 и f_2 от температуры, представленные на рис. 1, вычисленные из формул (1–6) по значениям коэффициентов из работы (Meissner, Wentz, 2004) и с учетом новых данных в области переохлаждения воды (и до $+4^\circ\text{C}$).

Из рис. 1 следует, что частота релаксации f_1 монотонно убывает при понижении температуры от $+80$ до -70°C , f_2 — растет при понижении температуры от $+100$ до -3°C и, далее, начинает падать. f_2 имеет характерный экстремум, однако и

f_1 имеет особенности. Представленные зависимости частот релаксации определяют диэлектрическую проницаемость воды в микроволновом диапазоне. f_1 по новым измерениям в области переохлаждения принимает значения от 10 до 1 ГГц, а f_2 — 300...20 ГГц. Из этих данных следует, что именно f_2 определяет ϵ на частотах выше 100 ГГц. Возможно, что полученные аналитические зависимости будут справедливы и до 500 ГГц, однако требуется их экспериментальное уточнение. На еще более высоких частотах потребуются учет влияния линий колебательного спектра молекул воды (и их кластеров).

Для определения причин возникновения двух температурных областей с различными коэффициентами в (3)...(6) были найдены производные частот релаксации по температуре. Наиболее информативными оказались вторые производные $\partial^2 f_{1,2}/\partial T^2$. Графики для них приведены на рис. 2, 3 с перекрытием при температурах от -20 до $+8^\circ\text{C}$. Отличие производных при состыковке графиков для положительных и отрицательных температур связано с погрешностями экспериментального определения ϵ в работах (Meissner, Wentz, 2004, Bordonskiy et al., 2020). Оно определяется и более сложными зависимостями частот релаксации в переходной области температур от стабильного к метастабильному состояниям воды. Графики второй производной, в отличие от графиков f_1 и f_2 (рис. 1), позволяют наглядно выделить области температуры, где происходят существенные изменения электрофизических характеристик воды.

Особенность вблизи $+4^\circ\text{C}$ в виде глубокого минимума можно связать с известным экстремумом плотности воды при $+3.98^\circ\text{C}$ (для давления 0.1 МПа) (Chaplin, 2020). Если считать, что эта особенность электромагнитных свойств воды

Таблица 1. Значения коэффициентов α_{0-10} в формулах (3–6)

i	α_i	i	α_i
0	5.6500	6	3.6143
1	1.6960×10^{-2}	7	2.8841×10^{-2}
2	-1.4810×10^{-4}	8	3.9208×10^{-1}
3	1.4627×10^1	9	-3.2094×10^{-3}
4	-4.2926×10^{-1}	10	7.6578×10^{-4}
5	7.5714×10^{-3}		

определяется молекулярным взаимодействием, то можно обратить внимание на особую аномалию, а именно, необычный температурный ход плотности воды (ρ_0) при температурах от $+4$ до -70°C . В этом температурном интервале плотность падает от значения ~ 1.0 до 0.9 г/см^3 (в отличие от характеристик “обычных” жидкостей, у которых ρ_0 возрастает при охлаждении).

Данное свойство определяется, по современным представлениям, структурными изменениями и взаимодействием двух видов кластеров воды: HDL — воды высокой плотности и LDL — воды низкой плотности (Woutersen et al., 2018). Их изменение происходит на пикосекундных временах. Концентрация и характеристики этих кластеров определяются термодинамической температурой среды. При температуре $\rightarrow 100^\circ\text{C}$ практически полностью преобладает HDL, а при -70°C преобладает LDL. Их концентрации выравниваются в области $-50...-60^\circ\text{C}$, где наблюдается наиболее яркая аномалия воды, линия Видома — locus в фазовом пространстве давление-температура, где резко возрастают флуктуации плотности и энтропии, а теплоемкость при постоянном давлении имеет максимум (Anisimov, 2012). С линией Видо-

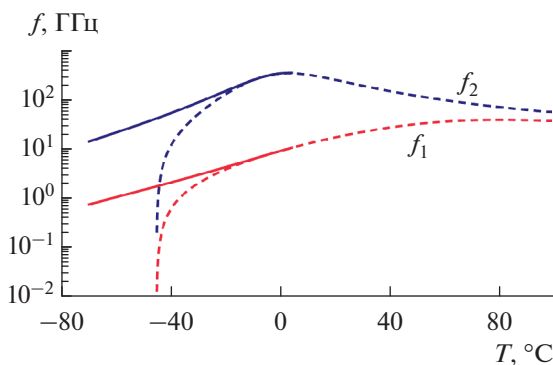


Рис. 1. Зависимости двух частот релаксации в формуле (1) от температуры в полулогарифмической шкале для интервала $-70...+4^\circ\text{C}$. Штриховой линией представлены результаты работы (Meissner, Wentz, 2004) для интервала $-45...+100^\circ\text{C}$.

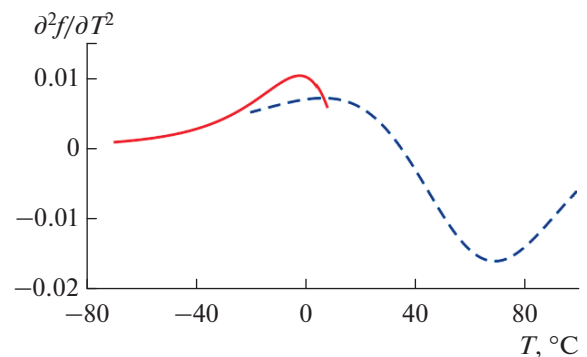


Рис. 2. Зависимость второй производной частоты релаксации f_1 по температуре от значения температуры. Штриховая линия — расчет по данным из (Meissner, Wentz, 2004).

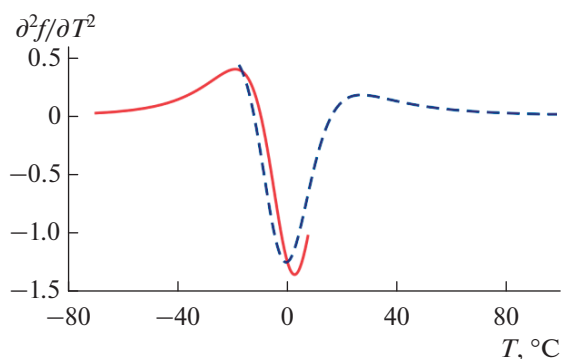


Рис. 3. Вторая производная частоты релаксации f_2 по температуре в зависимости от значения температуры. Штриховая линия — расчет по данным из (Meissner, Wentz, 2004).

ма связана вторая критическая точка воды, ее положение в фазовом пространстве соответствует приблизительно значению температуры -60°C и давлению ~ 100 МПа (Hundle et al., 2017).

Можно предположить, что проявление особых физических аномалий воды при температурах ниже $+4^\circ\text{C}$ приводит к изменению характера релаксации и зависимостей частот релаксации от температуры в области $+4\ldots-70^\circ\text{C}$. Отсюда вытекают: 1 — целесообразность введения второго члена в уравнение для диэлектрической проницаемости (то есть рассмотрение двухчастотной модели Дебая) из-за особенностей поляризации в структуре двух видов кластеров воды HDL и LDL; 2 — рассмотрение двух температурных областей релаксации вследствие влияния на этот процесс второй критической точки воды в области ее переохлаждения. Поэтому пограничное значение температуры, где происходит изменение характера зависимости f_2 , находится вблизи $+4^\circ\text{C}$, ниже которой наблюдается известная аномальная зависимость $\rho_0(T)$. Можно также ожидать изменения характера f_2 вблизи температуры -70°C , где аномалия ρ_0 исчезает. Однако проверка данной особенности, в настоящее время, практически невозможна из-за отсутствия эффективного метода получения объемной воды при температурах ниже -70°C . В природной среде в тропосферных облаках наблюдали наиболее низкую температуру микрокапельной воды -37°C (Rosenfeld, Woodley, 2000). В лабораторных условиях удалось получить температуру -46°C при испарении капель микронных размеров на время порядка миллисекунд (Sellberg et al., 2014). Структуру этих капель исследовали с помощью рентгеновского лазера фемтосекундной длительности. Тем не менее, на короткое время, глубоко переохлажденная вода может образовываться из газовой фракции в стратосфере и мезосфере, конденсируясь на твердых частицах при процессах химических превраще-

ний, с последующим ее переходом в лед (Russell, 2021).

РАСЧЕТЫ

В настоящем исследовании выполнены расчеты массового коэффициента поглощения (α_L) микрокапельных облаков (без учета эффектов рассеяния, которые проявляются в миллиметровом диапазоне для капель диаметром более 50 мкм (Battaglia et al., 2014)), и их сравнение с имеющимися данными для коротковолнового участка миллиметрового диапазона. Для него имеются расчеты и экспериментальная оценка до частоты 170 ГГц (Cadeddu, Turner, 2011), а также до 225 ГГц в (Turner et al., 2016). Массовый коэффициент поглощения, выраженный в непер/см, отнесенных к г/см^3 , рассчитывали с использованием приближения Релея:

$$\alpha_L = \frac{6\pi}{\lambda\rho_0} \text{Im} \left(\frac{\hat{\epsilon} - 1}{\hat{\epsilon} + 2} \right), \quad (7)$$

где λ — длина волны излучения, ρ_0 — плотность объемной воды, слабо зависящая от температуры. При этом коэффициент поглощения $\gamma = \alpha_L \rho_L$, где ρ_L — плотность водного аэрозоля.

Значения $\hat{\epsilon}$ в зависимости от длины волны и температуры находили из формул (1–6). Результаты расчетов α_L , как функции частоты, для различных значений температуры в области глубокого переохлаждения воды приведены на рис. 4, а, 4, б.

На рис. 5 приведены результаты расчетов α_L для частоты 170 и 130 ГГц, для которых имеются экспериментальные данные, в зависимости от температуры, графики 1, 2. Для сравнения также приведены графики для модели диэлектрической проницаемости на тех же частотах из статьи (Meissner, Wentz, 2004) — 3 (170 ГГц), 4 (130 ГГц).

Выполнено сравнение имеющихся в литературе данных (Cadeddu, Turner, 2011) с результатами новых расчетов — рис. 6. На нем приведены три точки для температур -30 , -20 и 0°C . Расхождения имеют место при температурах ниже -10°C . Точка при -30°C новых расчетов имеет значение около 24 (непер/см)/(г/см³), что находится в верхней части результатов различных экспериментальных моделей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Из представленных результатов сравнения массового коэффициента поглощения в миллиметровом диапазоне при понижении температуры облачного аэрозоля до -30°C наиболее близка к нашим расчетам модель L91 (Liebe et al., 1991). Различие данных сильно возрастает для существующих моделей при температурах ниже -10°C .

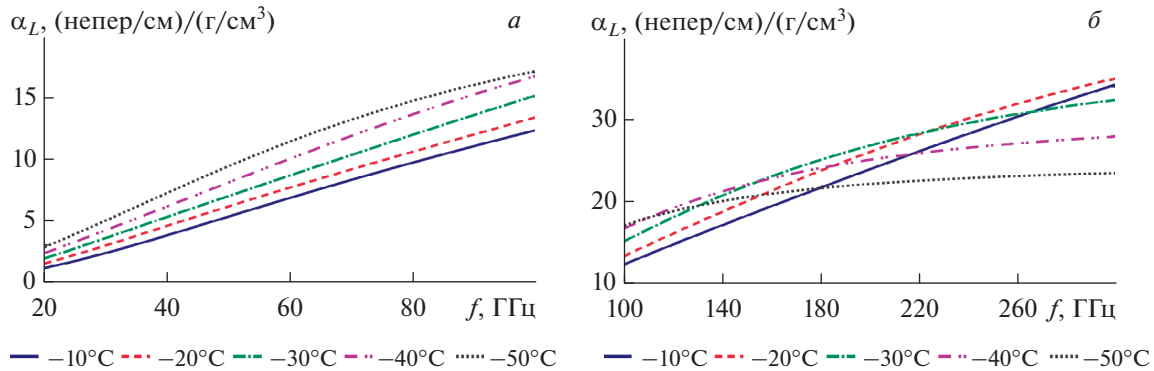


Рис. 4. Зависимости массового коэффициента поглощения от частоты для различных значений температур водного аэрозоля: а — для 20–100 ГГц, б — для 100–300 ГГц.

По этой причине предпочтительна представленная авторами модель, так как она основана на экспериментально найденных зависимостях частот релаксации в области глубокого переохлаждения. При этом обнаруживаются особенности поведения массового коэффициента поглощения в зависимости от температуры и частоты. На частотах 10...100 ГГц он возрастает с понижением температуры. Напротив, при стремлении частоты к 300 ГГц характер зависимости α_L изменяется, и массовый коэффициент поглощения уменьшается при понижении температуры. В диапазоне 100...300 ГГц обнаруживаются частотные интервалы, где массовый коэффициент поглощения слабо зависит от температуры, имеет место экстремум при некоторой температуре. Эти особенности определяются зависимостями f_1 и f_2 от температуры.

2. Особенности поведения электромагнитных характеристик переохлажденной воды, по-видимому, связаны с существованием ее известных термодинамических аномалий. Аномалии определяются характеристиками структурной организации воды в виде взаимодействующих кластеров HDL и LDL: воды высокой и низкой плотности.

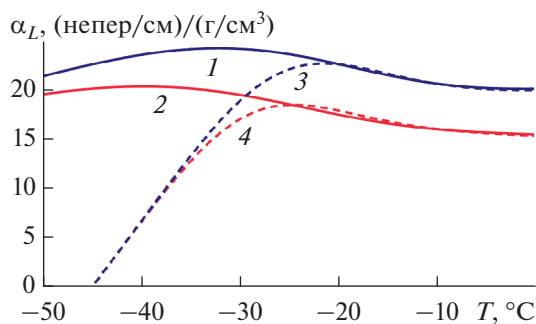


Рис. 5. Зависимости массового коэффициента поглощения от температуры на частоте 170 и 130 ГГц — 1, 2; расчет по модели (Meissner, Wentz, 2004) — 3, 4.

Этим объясняется необходимость описания диэлектрической релаксации с использованием двух частот релаксации в модели Дебая. Другую особенность — существование двух температурных областей диэлектрической релаксации можно объяснить влиянием второй критической точки и связанной с ней линией Видома в области отрицательных температур.

3. Получение холодной воды в интервале температур $-20\ldots-70^\circ\text{C}$ представляет сложную техническую проблему. При этом предложенные методы ее получения, например, при охлаждении в порах нанометровых размеров ставят задачу не только разработки методик переохлаждения, но и вопрос соответствия ее характеристик идеальной объемной метастабильной воде. Такая идеальная вода обычно рассматривается при компьютерном моделировании, где кластер (ограниченного размера), как правило, находится в свободном состоянии. В эксперименте всегда имеется влияние стенок пор и геометрии кластеров воды на элек-

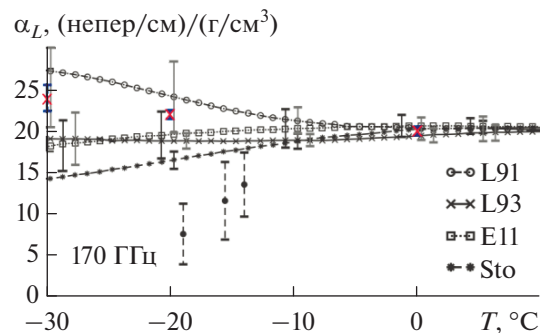


Рис. 6. Результаты измерений массового коэффициента поглощения от температуры и результаты вычислений для четырех моделей из статьи (Cadeddu, Turner, 2011): L91 — (Liebe et al., 1991), L93 — (Liebe et al., 1993), E11 — (Ellison, 2007), Sto — (Stogryn, 1995). Результаты новых расчетов отмечены в виде крестиков.

ромагнитный отклик. При этом характеристики воды могут определяться предысторией ее получения. Например, известно, что молекулы воды могут находиться в двух спиновых состояниях — орто и пара, характеризующихся параллельным и антипараллельным направлением спинов протонов (Kilaj et al., 2018). Молекулы с этими состояниями были пространственно разделены в специальных экспериментах на кластеры (Horke et al., 2014), которые могли сохраняться длительное время. Предсказывался отклик воды в зависимости от температуры на электромагнитные воздействия на определенных частотах из-за спиновых взаимодействий (Pershin, 2008). Поэтому можно предположить, что различные реальные водные образования будут иметь отличия диэлектрических характеристик, особенно в области отрицательных температур, где объемная вода термодинамически может находиться только в метастабильном состоянии. Решение данного вопроса дело будущих исследований.

4. Особой точкой на температурной зависимости в области глубокого переохлаждения является температура на линии Видома — локусе повышенных флуктуаций энтропии и плотности, проявляющихся в экстремуме теплоемкости при постоянном давлении (Ландау, Лифшиц, 2002). Вблизи этой линии находится и область повышенных флуктуаций энергии молекул, проявляющихся уменьшением теплоемкости при постоянном объеме (Ландау, Лифшиц, 2002). Высказывалось предположение, что этот рост флуктуаций энергии может приводить к возрастанию скорости химических превращений (Бордонский, Гурулев, 2019), а также некоторому росту фактора потерь воды в микроволновом диапазоне вблизи -45°C при давлении 0.1 МПа (соответствующей точке на линии Видома вблизи нормального атмосферного давления) (Бордонский, Орлов, 2019). Однако новые измерения не выявляют в пределах ошибок значительного эффекта приращения $\Delta\epsilon''$, либо он относится к узкому температурному интервалу и его сложно определить при автоматизированных измерениях с последующим усреднением результатов гладкими функциями, как это было выполнено в последующей работе (Bordonskiy et al., 2020).

5. В настоящее время сложно сделать вывод о точности соответствия микроволновых характеристик переохлажденной воды для тех или иных ее образований (в каплях микроэмульсий; в порах с различными материалами стенок; в растворах солей; в капельной жидкости аэрозолей; в биологических тканях; в воде, подвергающейся высоким давлениям и вариациям изотопного состава и т.д.). По существу, это связывается с отсутствием достаточного числа работ по экспериментальному исследованию холодной воды при глубоком

переохлаждении, кроме работ (Бордонский, Орлов, 2019, Bordonskiy et al., 2020), где измерения выполнены до -70°C в нанопористых силикатных материалах. Из обзора (Turner et al., 2016) следует, что за последнее столетие выполнено всего шесть лабораторных экспериментов для температур воды ниже -5°C , причем оценки ошибок определения ϵ' достигают 150%. В (Bordonskiy et al., 2020) точность измерений ϵ' и ϵ'' оценивалась значением $\sim$ единиц процентов вблизи -20°C и $\sim$ десятков процентов при -40°C . Эти данные определяют точность вычисления α_L по расчетам. При экстремально низких температурах она оказывается также в пределах нескольких десятков процентов. Тем не менее, такая точность определения α_L выше, чем разброс этой величины ($>100\%$) в моделях, представленных в (Turner et al., 2016) для частотного диапазона 1...500 ГГц и температур ниже -30°C .

ВЫВОДЫ

1. В настоящей работе на основе недавно выполненных экспериментов по измерению диэлектрической проницаемости переохлажденной воды до -70°C в микроволновом диапазоне (Bordonskiy et al., 2020) был рассчитан массовый коэффициент поглощения в облачных образованиях без учета рассеяния излучения на частотах 100...300 ГГц. Для расчетов использована модель Дебая с двумя частотами релаксации, которые устремляются к нулевому значению при температуре стеклования, равной -130°C . Одна из частот релаксации изменяется в пределах 20...300 ГГц, поэтому предполагается справедливость полученных результатов, по крайней мере, до 300 ГГц.

2. Расчеты массового коэффициента поглощения выявили особенности его частотных и температурных зависимостей. Необычным оказывается рост поглощения при понижении температуры на частотах до 180 ГГц. В диапазоне 100...300 ГГц обнаружены частотные интервалы, где имеет место слабая зависимость поглощения в некоторых областях температуры облачного аэрозоля (например, для частоты 120 ГГц это участок $-30...-50^{\circ}\text{C}$). Найденные особенности определяются температурным поведением двух частот релаксации воды в широком интервале температур. Особый характер их зависимостей, в свою очередь, определяется электрофизическими характеристиками кластеров воды низкой и высокой плотности (LDL и HDL) и влиянием на них второй критической точки.

3. Полученные результаты позволяют верифицировать имеющиеся экспериментальные данные о коэффициенте поглощения. Кроме того, на основе новых знаний о диэлектрической проницаемости глубоко переохлажденной воды в мил-

лиметровом диапазоне можно решать задачи по расчету эффектов переноса излучения в аэрозолях с учетом рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г.* Исследования радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах // Труды ГГО. Л.: Гидрометеиздат, 1968. № 222. Перенос микроволнового излучения в атмосфере. С. 100–110.
- Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г.* Определение температурной зависимости времени релаксации молекул воды в облаках и возможности оценки эффективной температуры капельных облаков по СВЧ радиометрическим измерениям // Изв. Вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 1. С. 52–57.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А.* О физико-химических превращениях с участием воды вблизи температуры –45°C // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. Т. 21. № 4. С. 478–489.
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2359>
- Бордонский Г.С., Орлов А.О.* Сравнение различных моделей фактора потерь переохлажденной воды с экспериментальными данными в микроволновом диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 104–112.
<https://doi.org/10.31857/S0205-961420193104-112>
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика. М.: Наука, 2002. 616 с.
- Меньшиков Л.И., Меньшиков П.Л., Федичев П.О.* Феноменологическая модель гидрофобных и гидрофильных взаимодействий // ЖЭТФ. 2017. Т. 152. № 6. С. 1374–1392.
<https://doi.org/10.7868/S0044451017120215>
- Anisimov M.A.* Cold and supercooled water: a novel supercritical-fluid solvent // Russ. J. Phys. Chem. B. 2012. V. 6. № 8. P. 861–867.
<https://doi.org/10.1134/S199079311208009X>
- Battaglia A., Westbrook C.D., Kneifel S., Kollias P., Humpage N., Löhnert U., Tyynelä J., Petty G.W.* G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. № 6. P. 1527–1546.
<https://doi.org/10.5194/amt-7-1527-2014>
- Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G.* The dielectric relaxation time of supercooled water // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. № 6. P. 3285–3290.
<https://doi.org/10.1063/1.443323>
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O.* Dielectric permittivity of deeply supercooled water according to the measurement data at the frequencies 7.6 GHz and 9.7 GHz // Preprint arXiv: 2005.07001v1. [cond-mat.soft]. 14 May 2020. 6 p.
- Cadeddu M.P., Turner D.D.* Evaluation of water permittivity models from ground-based observations of cold clouds at frequencies between 23 and 170 GHz // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2011. V. 49. № 8. P. 2999–3008.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2121074>
- Cerveny S., Mallamace F., Swenson J., Vogel M., Xu L.* Confined water as model of supercooled water // Chem. Rev. 2016. V. 116. № 13. P. 7608–7625.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00609>
- Chaplin M.* Water structure and science. URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/martin_chaplin.html (дата обращения 22.05.2020).
- Ellison W.J.* Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25THz and the temperature range 0–100°C // J. Chem. Phys. Ref. Data. 2007. V. 36. № 1. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1063/1.2360986>
- Greaves J.S., Richards A.M.S., Bains W., Rimmer P.B., Sagarwa H., Clements D.L., Seager S., Petkowski J.J., Sousa-Silva C., Ranjan S., Drabek-Maunder E., Fraser H.J., Cartwright A., Mueller-Wodarg I., Zhan Z., Friberg P., Coulson I., Lee E., Hoge J.* Phosphine gas in the cloud decks of Venus // Nature Astronomy. 2021. V. 5. P. 655–664.
<https://doi.org/10.1038/s41550-020-1174-4>
- Horke D.A., Chang Y.-P., Długołęcki K., Küpper J.* Separating para and ortho water // Angewandte Chemie. 2014. V. 53. № 44. P. 11965–11968.
<https://doi.org/10.1002/anie.201405986>
- Hundle P.H., Loerting T., Scortino F.* Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and no-man's land // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2017. V. 114. № 51. P. 13336–1/4.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1700103114>
- Kilaj A., Gao H., Rösch D., Rivero U., Küpper J., Willitsch S.* Observation of different reactivities of para and ortho-water towards trapped diazenylium ions // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 2096/1-7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04483-3>
- Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G.* Propagation modeling of moist air suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // Proc. NATO/AGARD Wave Propagation Panel, 52nd meeting. 17–20 May 1993. Mallorca, Spain. № 3/1–10.
- Liebe H.J., Hufford G.A., Manabe T.* A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12. № 7. P. 659–675.
<https://doi.org/10.1007/BF01008897>
- Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 9. P. 1836–1849.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
- Pershin S.M.* Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice // Physics of Wave Phenomena. 2008. V. 16. № 1. P. 15–25.
<https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x>
- Rosenfeld D., Woodley W.L.* Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to –37.5°C // Nature. 2000. V. 405. P. 440–442.
<https://doi.org/10.1038/35013030>
- Russell J.M.* Observations of polar mesospheric clouds from space and their scientific implications. [electronic resource].
https://www.agci.org/sites/default/files/pdfs/lib/main/10S1_0616_JRussell.pdf (submittal date: 26.02.2021).

Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmo H., Schlesinger D., Sierra R.G., Nordlund D., Hampton C.Y., Starodub D., DePonte D.P., Beye M., Chen C., Martin A.V., Barty A., Wikfeldt K.T., Weiss T.M., Caronna C., Feldkamp J., Skinner L.B., Seibert M.M., Messerschmidt M., Williams G.J., Boutet S., Pettersson L.G.M., Bogan M.J., Nilsson A. Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature // *Nature*. 2014. V. 510. № 7505. P. 381–384.
<https://doi.org/10.1038/nature13266>

Sharkov E.A. Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.

Stogryn P.A., Bull H.T., Rubayi K., Iravanchy S. The microwave permittivity of sea and fresh water. GenCorp Aerojet, Azusa, Calif., 1995. 24 p.

Turner D.D., Kneifel S., Cadeddu M.P. An improved liquid water absorption model at microwave frequencies for supercooled water clouds // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2016. V. 33. P. 33–44.

<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0074.1>

Woutersen S., Ensing B., Hilbers M., Zhao Z., Angell C.A. A liquid-liquid transition in supercooled aqueous solution related to the HDA-LDA transition // *Science*. 2018. V. 359. № 6380. P. 1127–1131.

<https://doi.org/10.1126/science.aao7049>

Absorption Coefficient of Cold Cloudy Aerosol at Frequencies of 100–300 GHz

G. S. Bordonskiy¹ and A. O. Orlov¹

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*

Calculations of the mass absorption coefficient in water aerosol of cloud formations at temperatures of 0...–50°C at frequencies of 100–300 GHz have been performed. In the calculations, the two-frequency Debye model for the dielectric constant was used, in which the relaxation frequencies of supercooled water were obtained from new experiments performed in the centimeter range. Of these, one relaxation frequency takes on the values of 10–1 GHz, the other – 300–20 GHz in the specified temperature range. The calculations are compared with the available experimental data of other authors up to a frequency of 170 GHz and a temperature of –30°C. There is a significant scatter in the experimental data on the mass absorption coefficient and the absence of satisfactory models for supercooled water below –20°C. On the basis of the performed research, it is assumed that the proposed refined formulas for the dielectric constant make it possible to determine the mass absorption coefficient up to frequencies of 200–300 GHz.

Keywords: supercooled water, microwaves, dielectric constant models, mass absorption coefficient, water aerosol

REFERENCES

Anisimov M.A. Cold and supercooled water: a novel supercritical-fluid solvent // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2012. V. 6. № 8. P. 861–867.

<https://doi.org/10.1134/S199079311208009X>

Basharinov A.E., Kutuza B.G. Issledovaniya radioizlucheniya i pogloscheniya oblachnoy atmosfery v millimetrovom i santimetrovom diapazonah [Investigations of radio emission and absorption of cloudy atmosphere in millimeter and centimeter ranges] // *Trudy GGO. L.: Gidrometeoizdat*, 1968. №. 222. Perenos mikrovolnovogo izlucheniya v atmosfere. P. 100–110. (In Russian)

Basharinov A.E., Kutuza B.G. Opredelenie temperaturnoy zavisimosti vremeni relaksatsii molekul vody v oblakakh i vozmozhnosti otsenki effektivnoy temperatury kapel'nykh oblakov po SVCh radiometricheskim izmereniyam [Determination of the temperature dependence of the relaxation time of water molecules in clouds and the possibility of estimating the effective temperature of drop clouds from microwave radiometric measurements] // *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*. 1974. V. 17. № 1. P. 52–57. (In Russian)

Battaglia A., Westbrook C.D., Kneifel S., Kollias P., Humpage N., Löhnert U., Tyynelä J., Petty G.W. G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. № 6. P. 1527–1546. doi: 10.5194/amt-7-1527-2014.

Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G. The dielectric relaxation time of supercooled water // *J. Chem. Phys.* 1982.

V. 76. № 6. P. 3285–3290.

<https://doi.org/10.1063/1.443323>

Bordonskiy G.S., Gurulev A.A. O fiziko-khimicheskikh prevrashcheniyah s uchastiem vody vblizi temperatury –45°C [Regarding physical and chemical transformations with the involvement of water near –45°C] // *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. 2019. V. 21. № 4. P. 478–489.

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2359>. (In Russian)

Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O. Dielectric permittivity of deeply supercooled water according to the measurement data at the frequencies 7.6 and 9.7 GHz // Preprint arXiv: 2005.07001v1. [cond-mat.soft]. 14 May 2020. 6 p.

Bordonskiy G.S., Orlov A.O. Sravnenie razlichnykh modeley faktora poter' pereohlazhdennoy vody s eksperimental'nymi dannymi v mikrovolnovom diapazone [Comparison of various models of supercooled water-loss factor with experimental data in the microwave range] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 3. P. 104–112.

<https://doi.org/10.31857/S0205-961420193104-112>. (In Russian)

Cadeddu M.P., Turner D.D. Evaluation of water permittivity models from ground-based observations of cold clouds at frequencies between 23 and 170 GHz // *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 2011. V. 49. № 8. P. 2999–3008.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2121074>

- Cerveny S., Mallamace F., Swenson J., Vogel M., Xu L.* Confined water as model of supercooled water // *Chem. Rev.* 2016. V. 116. № 13. P. 7608–7625.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00609>
- Chaplin M.* Water structure and science. 2020. URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/martin_chaplin.html
- Ellison W.J.* Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25THz and the temperature range 0–100°C // *J. Chem. Phys. Ref. Data.* 2007. V. 36. № 1. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1063/1.2360986>
- Greaves J.S., Richards A.M.S., Bains W., Rimmer P.B., Saga-wa H., Clements D.L., Seager S., Petkowski J.J., Sousa-Silva C., Ranjan S., Drabek-Maunders E., Fraser H.J., Cartwright A., Mueller-Wodarg I., Zhan Z., Friberg P., Coulson I., Lee E., Hoge J.* Phosphine gas in the cloud decks of Venus // *Nature Astronomy.* 2021. V. 5. P. 655–664.
<https://doi.org/10.1038/s41550-020-1174-4>
- Horke D.A., Chang Y.-P., Długołęcki K., Küpper J.* Separating para and ortho water // *Angewandte Chemie.* 2014. V. 53. № 44. P. 11965–11968. doi: 10.1002/anie.201405986.
- Hundle P.H., Loerting T., Scortino F.* Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and no-man's land // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA.* 2017. V. 114. № 51. P. 13336–1/4.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1700103114>
- Kilaj A., Gao H., Rösch D., Rivero U., Küpper J., Willitsch S.* Observation of different reactivities of para and ortho-water towards trapped diazenylium ions // *Nature Communications.* 2018. V. 9. P. 2096/1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04483-3>
- Landau L.D., Lifshits E.M.* Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика [Theoretical physics. V. 5. Statistical physics]. М.: Наука, 2002. 616 p. (In Russian)
- Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G.* Propagation modeling of moist air suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // *Proc. NATO/AGARD Wave Propagation Panel, 52nd meeting, 17-20 May 1993, Mallorca, Spain.* № 3/1–10.
- Liebe H.J., Hufford G.A., Manabe T.* A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.* 1991. V. 12. № 7. P. 659–675.
<https://doi.org/10.1007/BF01008897>
- Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004. V. 42. № 9. P. 1836–1849.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
- Men'shikov L.I., Men'shikov P.L., Fedichev P.O.* Fenomenologicheskaya model' gidrofobnyh i gidrofil'nyh vzaimodeystviy [Phenomenological model of hydrophobic and hydrophilic interactions] // *ZhETF.* 2017. V. 152. № 6. P. 1374–1392.
<https://doi.org/10.7868/S0044451017120215>. (In Russian)
- Pershin S.M.* Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice // *Physics of Wave Phenomena.* 2008. V. 16. № 1. P. 15–25.
<https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x>
- Rosenfeld D., Woodley W.L.* Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to –37.5°C // *Nature.* 2000. V. 405. P. 440–442.
<https://doi.org/10.1038/35013030>
- Russell J.M.* Observations of polar mesospheric clouds from space and their scientific implications. [electronic resource]. URL: https://www.agci.org/sites/default/files/pdfs/lib/main/10S1_0616_JRussell.pdf (submittal date: 26.02.2021).
- Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmo-no H., Schlesinger D., Sierra R.G., Nordlund D., Hampton C.Y., Starodub D., DePonte D.P., Beye M., Chen C., Martin A.V., Barty A., Wikfeldt K.T., Weiss T.M., Caronna C., Feldkamp J., Skinner L.B., Seibert M.M., Messerschmidt M., Williams G.J., Boutet S., Pettersson L.G.M., Bogan M.J., Nilsson A.* Ultra-fast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature // *Nature.* 2014. V. 510. № 7505. P. 381–384.
<https://doi.org/10.1038/nature13266>
- Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Stogryn P.A., Bull H. T., Rubayi K., Iravanchy S.* The microwave permittivity of sea and fresh water. GenCorp Aerojet, Azusa, Calif., 1995. 24 p.
- Turner D.D., Kneifel S., Cadeddu M.P.* An improved liquid water absorption model at microwave frequencies for supercooled water clouds // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2016. V. 33. P. 33–44.
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0074.1>
- Woutersen S., Ensing B., Hilbers M., Zhao Z., Angell C.A.* A liquid-liquid transition in supercooled aqueous solution related to the HDA-LDA transition // *Science.* 2018. V. 359. № 6380. P. 1127–1131.
<https://doi.org/10.1126/science.aao7049>