

УДК 538.956+538.915

ПОИСКИ ЛЬДА 0 В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

© 2024 г. Г. С. Бордонский*, В. А. Казанцев, А. К. Козлов

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, 16а, Чита, 672002, Россия

*e-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 12.10.2023 г.

После доработки 13.06.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

В последнее десятилетие было показано, что в большинстве случаев атмосферный лед состоит из смеси льдов Ih и Ic, он называется льдом с нарушением укладки или штабелированным льдом Isd (stacking disordered ice). Кроме того, стало известно о существовании еще одной кристаллической модификации льда, названной льдом 0. Лед 0 является переходной формой от глубоко переохлажденной воды ко льдам Ih и Ic, образующимся при температуре ниже -23°C (при низких давлениях). По этой причине возник вопрос о возможности образования в структуре льда Isd льда 0. Для выяснения вопроса были выполнены лабораторные эксперименты по получению слоев льда 0 на поверхности льда Ih, а также диэлектрические измерения материала атмосферного льда из выпавшего града. Полученные результаты подтвердили возможность образования льда 0 в структуре штабелированного льда Isd. Особым свойством такой структуры является появление контактных слоев с высокой электропроводностью, что существенно изменяет электрофизические характеристики ледяных частиц. Например, в частицах малых размеров возникают резонансы плазмонных колебаний, которые влияют на перенос электромагнитного излучения в облачных образованиях. Изучение электромагнитных свойств малых ледяных частиц, содержащих лед 0, и их особенностей в различных областях атмосферы позволит решать ряд важных задач. К ним можно отнести уточнение радиационного баланса земной поверхности, грозовые явления, перенос излучения в облачных образованиях и физико-химические процессы в аэрозолях и снежных покровах.

Ключевые слова: лед 0, экстинкция, лед Isd, ледяные частицы, плазмонный резонанс

DOI: 10.31857/S0002351524060089 **EDN:** HUQETH

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [Russo et al., 2014; Quigley et al., 2014; Slater et al., 2014] в 2014 г. сообщалось об обнаружении при компьютерном моделировании метастабильного льда 0, образующегося из глубоко переохлажденной воды при температурах ниже -23°C (для атмосферного давления). Считается, что лед 0 является переходной формой ко льдам Ih и Ic. Его элементарная ячейка состоит из 12 молекул воды с пространственной группой $P4_1/m3m$.

При теоретических предсказаниях новых модификаций льда возникает вопрос о их реальном существовании в природной среде, т.е. устойчивости структуры на время, достаточное для выполнения ее наблюдений. В лабораторном эксперименте в 2020 г. в [Бордонский и др., 2020а] было показано образование островковых пленок льда 0 на подложках из диэлектрических материалов. Важной особенностью льда 0 является его сегнетоэлектри-

ческое поведение, что и было использовано для обнаружения данной модификации льда при просвечивании образцов лазерным излучением. Ранее было известно, что на границе сегнетоэлектрика и диэлектрика возникает слой нанометровой толщины с высокой электропроводностью, близкой к металлической [Kobayevnikov et al., 2005]. В среде с металлической проводимостью действительная часть диэлектрической проницаемости (ϵ') становится отрицательной, что имеет место на частотах электромагнитного поля ниже плазменной частоты (ω_p) [Борен и др., 1986]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}, \quad (1)$$

где n — концентрация зарядов, e — заряд частицы плазмы, m — масса частицы.

Максимум рассеяния излучения на малых сферических частицах в атмосфере наблюдается вбли-

зи $\epsilon' = -2$, что соответствует особой частоте, называемой частотой Фрелиха [Борен и др., 1986]. По теории Друде–Лоренца ϵ' для металлов отрицательна от частот оптического диапазона до радиочастотного диапазона. В [Бордонский и др., 2020б] был рассмотрен вопрос о существовании льда 0 на земной поверхности, т.е. в среде обитания живых организмов, а также в холодных слоях атмосферы. Было высказано предположение о том, что лед 0 может образовываться в мезосфере, где температура понижается в летний период до значений -110°C и ниже. В частности, так называемые «серебристые» облака могут светиться из-за рассеяния солнечного излучения на пылевых частицах, покрытых льдом 0 [Bordonskiy et al., 2019].

Цель настоящей работы продолжить поиски льда 0 в земной атмосфере в составе недавно открытого льда с нарушением укладки — льда Isd. Для этого необходимо экспериментально показать, что лед 0 может образовываться при конденсации паров воды не только на диэлектрических материалах, но и на поверхности льда Ih. Это не является тривиальным процессом, так как водяные пары могут конденсироваться непосредственно превращаясь в лед Ih или Ic. Кроме того, необходимо было выяснить до каких температур мог существовать лед 0 в смеси со льдом Ih.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА 0 В СМЕСИ С ДРУГИМИ ПРИРОДНЫМИ ЛЬДАМИ

Определенной неожиданностью последнего десятилетия стало открытие того факта, что образующийся природный лед обладает сложной структурой. Ранее считалось, что при замерзании воды в обычных условиях в земных оболочках возникает гексагональный лед Ih (Котляков и др., 1984). Был также известен метастабильный кубический лед Ic, образующийся при конденсации паров воды при температуре около -120°C . При использовании более совершенных методов измерений и обработки данных рентгеновских, нейтронных и других методов было обнаружено, что в большинстве случаев образцы льда представляют собой смесь льдов Ih и Ic с беспорядочной укладкой. Его назвали штабелированным (или льдом с нарушением укладки) — льдом Isd (stacking disordered ice) [Salzmann, 2019; Leoni, Russo, 2021].

В работе [Murray et al., 2014] было обращено внимание на обилие ледяных кристаллов, имеющих тройную вращательную симметрию, собранных в облаках, из осадков, алмазной пыли и других

ледяных объектов. Их размеры находятся в пределах 5–100 мкм, а температура среды, в которой их обнаружили, достигала -90°C (температура, при которой они возникли неизвестна). В настоящее время считается, что тройная симметрия вращения формы ледяных частиц определяется льдом Isd [Murray et al., 2014]. Эксперименты показали, что нарушение укладки быстро исчезает при температуре -10°C . При температуре -30°C нарушение укладки существует в течении нескольких часов. Оно, по-видимому, может долго сохраняться при температуре -80°C , т.е. в мезосфере. Возникает вопрос — возможно ли образование в штабелированном льде Isd не только льдов Ih, Ic, но и слоев из недавно открытого льда 0. Сложность регистрации льда 0 обычными методами связана с возможной его низкой концентрацией в образцах.

Следует отметить, что для возникновения метастабильной кристаллической структуры при некоторой температуре T_1 (которая ниже температуры фазового перехода в стабильную фазу T_0), исходная жидкость должна быть переохлаждена существенно ниже T_1 (сверхпереохлаждение, которое должно быть больше значения $[T_0 - T_1]$) [Харлак и др., 2010]. В случае льда 0 значение температуры сверхпереохлаждения должно быть около -46°C . Однако надо учитывать, что при температуре -45°C в переохлажденной воде реализуется состояние с повышенной флуктуацией ее энтропии и плотности (на линии Видома). Поэтому для образования льда 0 необходимо переохлаждение до $\sim -50 \dots -120^\circ\text{C}$. Значение -120°C связано с представлением о том, что оно является границей стеклообразного состояния льда. Чисто практически, верхняя граница образования льда определяется тем, что при конденсации паров воды, происходит выделение теплоты фазового перехода. Поэтому представляется сложным получить лед 0 при температурах, выше $-50^\circ\text{C} \dots -23^\circ\text{C}$ (за исключением случаев медленной конденсации паров и эффективного отвода выделяющейся теплоты).

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ ЛЬДА 0 В СТРУКТУРЕ ISD

Поставленный выше вопрос о возможности появления льда 0 в структуре льда Isd экспериментально решали с использованием методики его регистрации, представленной в [Бордонский и др., 2020а]. В этой методике использовали особые электрические свойства контактных слоев сегнетоэлектрических сред с диэлектриками. Эти слои имеют нанометровые толщины и обладают высокой электропроводностью по сравнению с объемами контактирующих материалов (выше на 6–7 порядков

величины). При этом при просвечивании образцов электромагнитным излучением наблюдается сильная экстинкция, определяемая появлением рассеяния и поглощения излучения. Она связана с возникновением так называемых поверхностных плазмонных колебаний в нанометровых слоях [Борен и др., 1986], уникальном явлении изучаемом в последние десятилетия в научном направлении — плазмонике [Новотный и др., 2009].

Усиление электромагнитного поля на проводящих нанометровых структурах позволяет определить мельчайшие изменения состояния среды. Аналогичное явление, например, проявляется в эффекте гигантского комбинационного рассеяния света, при котором усиление сигнала рассеяния от исследуемого материала, помещенного на специализированные металлические наноструктуры, может достигать 10^{12} [Новотный и др., 2009]. Поэтому, плазмонные эффекты, существенно усиливающие рассеяние и поглощение электромагнитного излучения, а также специальная процедура приготовления образцов могут обеспечить эффективное обнаружение льда 0 при весьма малых концентрациях в среде. Это было ранее продемонстрировано в работе [Бордонский и др., 2020].

А) *Эксперимент по поиску льда 0 в составе льда Ih.* Схема установки для исследования образования льда 0 при его конденсации на образец из льда Ih приведена на рис. 1. В ней для детектирования образования льда 0 использовали световое излучение на длинах волн 0.4–0.7 мкм, проходящее через образец льда Ih в виде тонкой пластинки.

Излучение в видимом диапазоне от галогеновой лампы создавали источником (1) см. рис. 1. Пучок излучения модулировали диском с прорезями (2). Излучение проходило через пластинку из льда (3), на которую конденсируются пары воды, и поступало на фотодиод, усилитель и синхронный детектор (5). Образец находится в камере (4), охлаждаемой парами азота. Холодные пары азота поступают из сосуда Дьюара (6), их подача регулируется током (I) резистора испарителя (8). Температура поверхности пластины измеряется термопарой «Т». Точность измерений температуры $\sim 1^\circ\text{C}$. Информация поступает в систему ее сбора. Измерения были выполнены в лаборатории при температуре 20°C и относительной влажности воздуха 15...20 %. Установка выдерживалась в данных условиях в течение нескольких дней.

Образец льда в виде пластинки, толщиной в несколько миллиметров, выпиливали из ледяного покрова ультрапресного озера. Как ожидалось, он

полностью должен состоять из льда Ih, так как длительное время находился при средней температуре $\sim -5^\circ\text{C}$.

После помещения образца в установку при температуре -5°C в камеру подавали пары азота и из нее вытеснялся воздух, включая водяные пары. При достижении температуры образца $\sim -90\text{...}-100^\circ\text{C}$ подачу холодных паров прекращали и начинался процесс медленного монотонного нагревания образца за счет притока теплоты извне. Так как стенки камеры и ее периферийные детали выделяли адсорбированные молекулы воды, они, диффундируя в холодную центральную часть камеры, конденсировались на образец из льда Ih. Таким методом осаждали пленки льда 0 нанометровой толщины в работе [Бордонский и др., 2020a]. Результаты эксперимента представлены на рис. 2, где приведены графики пропускаемой мощности излучения в видимом диапазоне. Стрелки вблизи графиков указывают направление изменения температуры. Наклон верхнего графика и несовпадение начального и конечного значений проходящей мощности определяются температурным дрейфом параметров фотодиода, расположенного вблизи охлаждаемой камеры. Из графиков хорошо видно появление дополнительного затухания излучения, которое началось от значения температуры -80°C и вышло на насыщение вблизи -60°C . При последующем нагревании затухание стало резко

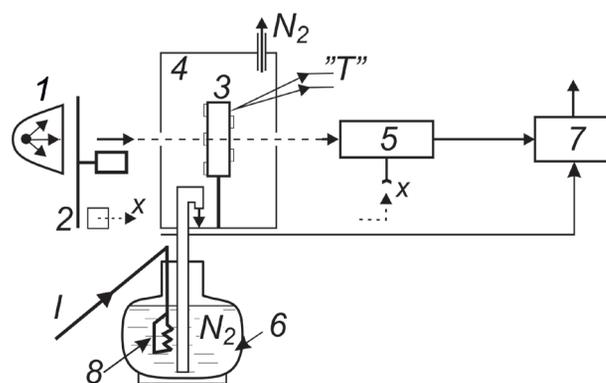


Рис. 1. Схема измерения прохождения излучения в видимом диапазоне через пластинку льда при конденсации на нее паров воды. 1 — галогеновая лампа, 2 — диск модулятора излучения, 3 — пластина из льда Ih, 4 — охлаждаемая камера из полиэтиленовой пленки, 5 — фотодиод с усилителем и синхронным детектором, 6 — сосуд Дьюара с жидким азотом (N_2), 7 — система сбора и накопления информации, «Т» — датчик температуры поверхности образца, I — ток нагревателя для подачи холодных паров азота в камеру, 8 — резистор испарителя.

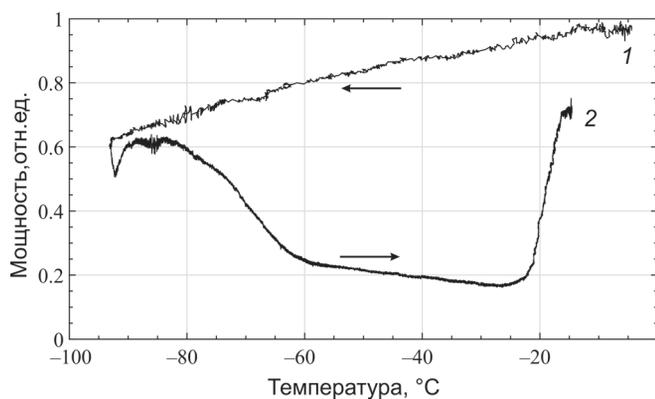


Рис. 2. Зависимость от температуры интенсивности прошедшей через пластинку из льда Ih излучения видимого диапазона при осаждении пленки льда 0. 1 — начало измерений; стрелки указывают направление изменения температуры во времени. 2 — завершение измерений.

уменьшаться после перехода температуры образца значений $\sim -25...-22^{\circ}\text{C}$. Такой вид зависимости проходящей мощности наблюдали в предыдущих экспериментах с подложками из кварцевого стекла, слюды и хлорида натрия [Бордонский и др., 2020a], где его связали с образованием льда 0.

Б) *Эксперимент по определению верхней границы температуры существования льда 0 в природном льде Isd.* Лед 0 исчезает при температурах выше -23°C , то же для льда Ic при температурах выше -80°C [Ефимов и др., 2011]. Однако в порах углеродных нанотрубок лед Ic был обнаружен даже при температурах около -30°C [Sliwinska–Bartkowiak et al., 2008], а в атмосферных частицах до температур -5°C [Murray et al., 2014].

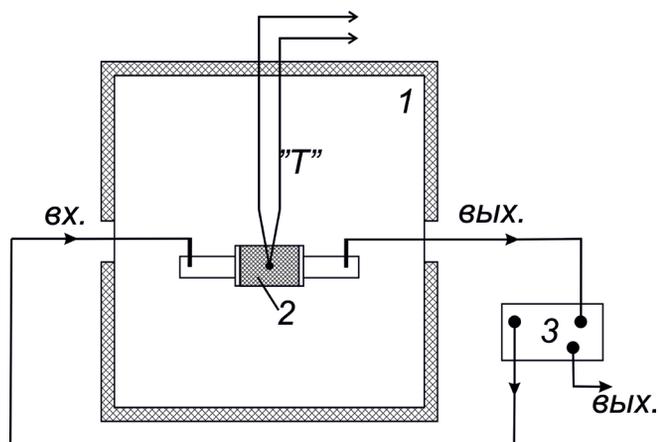


Рис. 3. Схема эксперимента по исследованию материала ледяного града в резонаторе для определения образования льда 0 в составе штабелированного льда. 1 — климатическая камера, 2 — резонатор, 3 — векторный анализатор, «Т» — датчик температуры.

Для решения вопроса по определению верхней температурной границы существования льда 0 был выполнен эксперимент по измерениям комплексной диэлектрической проницаемости ($\hat{\epsilon} = \epsilon' + \epsilon''$) атмосферного льда, полученного из частиц града. Измерения были выполнены с использованием микроволнового резонатора. Выпавший в летнее время град помещали в холодильник и хранили при температуре -11°C . После выдержки в течение 18 часов, градины переносили в прямоугольный резонатор, который помещали в климатическую камеру для температурных измерений $\hat{\epsilon}$. Измерения проводились вблизи частоты 4.4 ГГц. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

Климатическая камера (1) позволяла охлаждать прямоугольный резонатор с градом (2) до температуры -60°C . При помощи векторного анализатора (3) регистрировали резонансную кривую резонатора со средой и по ней определяли ϵ' и ϵ'' материала града по стандартной методике резонансных измерений при полном заполнении резонатора, вариант которой представлен в [Бордонский и др., 2022].

Температуру образца определяли при помощи термопары «Т». В процессе измерений находили изменение действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей относительной диэлектрической проницаемости в цикле охлаждение — нагревание резонатора.

Известно, что градины имеют сложную слоистую структуру при формировании частиц в сильно изменяющихся условиях из-за быстрого их прохождения через слои с высоким градиентом температуры и влажности [Allen et al., 2020]. Если в составе градины имеются области накопления льда 0, то при вариациях температуры среды этот лед может исчезать и снова образовываться. Такая ситуация известна для сегнетоэлектрического льда XI, который также существует при атмосферном давлении, но при значительно более низких температурах. Если кристаллы этого льда образовались, то в случае нагревания его зародыши остаются и при более высоких температурах [Arakawa et al., 2011]. Верхняя температурная граница существования льда XI при атмосферном давлении $\sim -200^{\circ}\text{C}$, но при нагревании до -162°C , как оказалось, он снова может образовываться при охлаждении образца льда («эффект памяти»). Предполагалось, что лед XI и его домены электрического поля могут существовать до температуры -120°C , но, возможно, из-за концентрации этого льда ниже 1% они не регистрировались существующими методами анализа структуры.

В использованной методике из-за резонанса плазмонных мод достаточны слои сегнетоэлектрического льда порядка 10 нм в островковых пленках,

что существенно повышает ее чувствительность. Следовательно, при циклическом изменении температуры образца изо льда градин можно наблюдать гистерезис ϵ' и ϵ'' с характерными температурными границами процесса. Гистерезис электрических величин является типичным для сегнетоэлектриков и будет являться доказательством наличия в среде сегнетоэлектрической фазы. Границы будут характеризовать температуру перехода льда 0 в лед Ih при охлаждении — нагревании града в резонаторе.

Результаты измерений ϵ' града в первые сутки его существования и через трое последующих суток приведены на рис. 4, 5. Характерной особенностью графиков является гистерезис ϵ' и особенно ϵ'' . В наибольшей степени это заметно для града в первые сутки его существования. На 4-е сутки наблюдали существенно меньшее проявление гисте-

резиса. Следует отметить, что ϵ'' (фактор потерь) возрастал в зависимости от температуры после охлаждения образца, что имело место при последующем его нагревании. Также наблюдали сильные флуктуации ϵ'' , при нагревании образца. Данное сложное поведение можно объяснить появлением льда 0 при охлаждении пленок переохлажденной воды в градинах и неустойчивостью электрической структуры метастабильной фазы при ее дальнейшем нагревании.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. В настоящее время стало общепринятым представление образования в атмосфере, а также в пористых средах штабелированного льда *Isd*. Разнообразие структуры такого льда, состоящей из смеси льдов Ih и Ic, связано как с особенностями

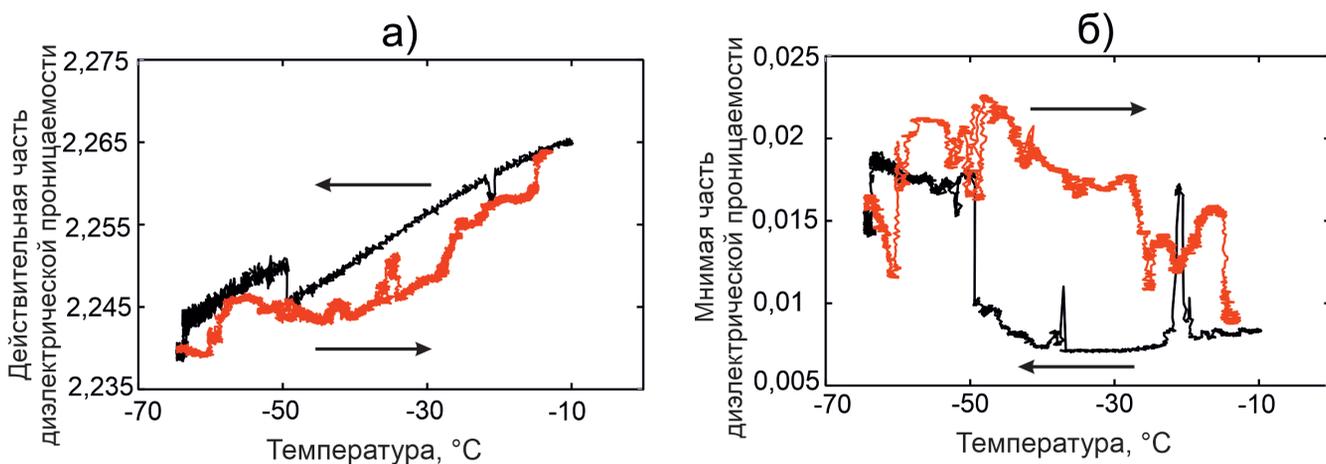


Рис. 4. Зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) материала града от температуры при ее циклическом изменении. Измерение после 18 ч хранения града в холодильнике. Стрелки показывают направление изменения температуры.

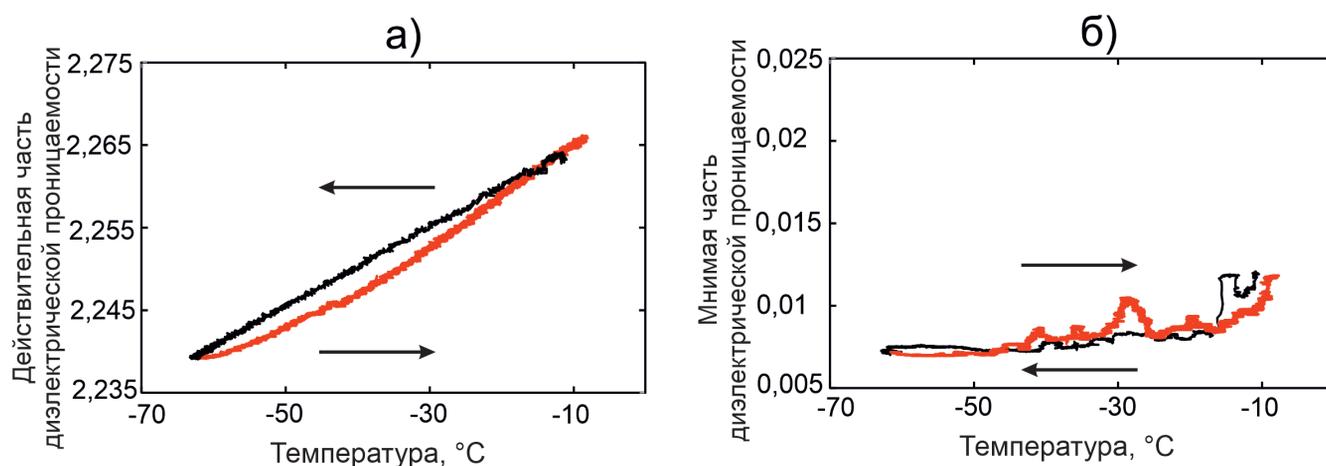


Рис. 5. а) Зависимость ϵ' от температуры, б) зависимость ϵ'' от температуры. Измерения после трех сут хранения образца града в резонаторе. Стрелки показывают направление изменения температуры.

кристаллической структуры модификаций льда, так и с нарушением симметрии окружающей среды (принцип Кюри [Шувалов и др., 1981]).

На основе выполненного эксперимента можно предположить, что в состав льда Isd может входить недавно открытый лед 0. Такая возможность существенно расширяет круг допустимых физико-химических характеристик ледяных частиц в различных областях атмосферы. При медленном замерзании переохлажденной воды температура его образования составляет -23°C при атмосферном давлении. Однако характерные температуры появления льда 0 в составе льда Isd или при конденсации паров на пылевых частицах приблизительно составляют -50°C ... -140°C .

Теоретические предположения о появлении в составе льда Isd льда 0 было исследовано в недавней работе [Leoni et al., 2019]. В ней было показано, что лед 0 предпочтительно образуется в небольших плоских кластерах с содержанием молекул менее 40. В более крупных кластерах предпочтительно образуются льды Ih и Ic. Поэтому, хотя концентрация льда 0 в ледяных структурах может быть невелика, однако, из-за его сегнетоэлектрических свойств, в среде Isd могут возникать слои с высокой электропроводностью. Наличие таких «металлических» слоев нанометрового размеров приводит к появлению плазмонных эффектов, необычно сильно изменяющих электромагнитные характеристики атмосферного льда [Бордонский и др., 2020a]. Эти эффекты могут проявляться при образовании льда 0 в общей массе ледяных образований в малых долях процента.

2. Влиянием льда 0 в атмосферных ледяных частицах можно объяснить известные оптические атмосферные и радиоволновые явления. Одно из них — свечение серебристых облаков, образовавшихся в мезосфере на высотах 80...90 км, в которых температура может опускаться ниже -100°C и существовать условия конденсации паров на пылевых частицах космического и земного происхождения. Эта гипотеза была представлена в работе [Bordonsriy et al., 2019; Бордонский и др., 2020б]. Свечение определяется отражением излучения Солнца при его восходе и заходе из-за подсветки нижней границы серебристых облаков и сильного рассеяния излучения ледяными частицами видимого света. Это явление, несмотря на более чем столетнее исследование, еще полностью не объяснено. Данный вывод был сделан в обзорной статье [Kokhanovsky, 2005], опубликованной в 2005 году. Например, одна из проблем заключается в количественном несоответствии эффектов рассеяния

результатов различных авторов на основе теории рассеяния электромагнитного излучения Ми, справедливой для сферических частиц. Возникший вопрос пытались решить с помощью комбинаций форм и размеров ледяных частиц. При этом полученные результаты могли быть объяснены существованием в мезосферных облаках игольчатых кристаллов ледяных частиц, которые, однако, не образуются в серебристых облаках. Имеющиеся вопросы не были решены за прошедшие два десятилетия. Более того, появилась новая принципиальная сложность в объяснении электромагнитных характеристик серебристых облаков. Так, в ряде работ было обнаружено заметное отражение от серебристых облаков низкочастотных радаров на частотах от 2.7 МГц до единиц гигагерц [Ролдугин и др., 2018]. Однако при возрастании длины волны в миллионы раз, по сравнению с видимым диапазоном, невозможно объяснить наблюдаемый эффект отражения радарных сигналов от наноразмерных ледяных частиц мезосферы. Попытка объяснить наблюдения наличием слоя железа или натрия на поверхности частиц, то есть их металлизацией, не нашла экспериментального подтверждения.

Среди других оптических явлений в атмосфере можно отметить яркое свечение мелких ледяных частиц, названных «алмазной» пылью. Известно также образование светящихся столбов от фонарей в арктическом регионе, отмеченное при температуре воздуха ниже -20°C . Нарушение укладки обнаружено в кристаллах с трехкратной вращательной симметрией [Murray et al., 2014]. Многочисленные изображения атмосферных тригональных ледяных кристаллов встречаются в широком диапазоне атмосферных условий при температуре от -84°C до -5°C и наблюдаются в облаках по всему земному шару [Murray et al., 2014]. Они были представлены еще в коллекции фотографий [Libbrecht, 2005], где приведено около 6 тысяч разнообразных ледяных кристаллов, обнаруженных Бентли в снеге в период между 1885 и 1931 годами.

3. Наблюдаемые электромагнитные аномалии могут быть объяснены в рамках представленной гипотезы о наличии в составе ледяных частиц — льда 0 из-за появления металлической проводимости в контактном слое этого льда с другими модификациями льда или частицами из диэлектрика. Как представлено в работе [Завитаев и др., 2004], для решения задачи о взаимодействии излучения с металлическими частицами, размеры которых много меньше длины волны, требуется использование кинетической теории, поскольку примене-

ние теории Ми неудовлетворительно. Кроме того, требуется исследование влияния возникновения резонанса плазмонных мод на взаимодействие ледяных частиц с электромагнитным полем. При этом решение существенно изменяется и рассеяние становится значительным до частот радиодиапазона, особенно в случае частиц анизотропной формы [Борен и др., 1986].

Очевидно, что лед Isd может порождать большое число различных микроскопических образований. Высказывалось также предположение, что лед Isd представляет собой отдельную фазу, как и льды Ih и Ic, которая может обладать специфическими физическими характеристиками. В частности, имеется пример для кристаллов ZnS, для которых при переходе от одного вида штабелированной структуры к другой происходит изменение свойств материала, например, появление вариаций степени двулучепреломления [Varn et al., 2016]. Данное предположение, возможно, в наибольшей степени подходит для случая, когда в структуре льда Isd, появляется лед 0, существенно влияющий на электромагнитные свойства среды. Например, в спектре серебристых облаков наблюдалось излучение с круговой поляризацией [Kokhanovsky, 2005], которое не было объяснено.

4. В работе [Varn et al., 2016] обсуждались вопросы классификации хаотической укладки кристаллов, в том числе льдов. Истоки обсуждаемых идей восходят к работам Э. Шредингера, предложившего для описания структуры молекулы ДНК термин «апериодический кристалл» [Шредингер, 2002]. Для описания любого вида структур (периодических, апериодических, хаотических) предложена классификация по двум параметрам: сложности и избыточной энтропии. Под сложностью понимают скорость изменения энтропии при ее определении вдоль некоторого направления в среде. Льды Ih и Ic располагаются на диаграмме сложности в начале координат. Квазикристаллы расположены на оси сложности, а штабелированные кристаллы на плоскости диаграммы. Предполагают, что такой информационный подход позволит классифицировать единым образом материалы с различной организацией: апериодические кристаллы, стекла, лиотропные жидкие кристаллы, системы с пятиугольной симметрией и другие.

5. Существует также и ряд мало исследованных вопросов физики воды и льда. Например, проявление упорядоченности спиновых состояний протонов в молекулах воды и различие химической активности воды из-за ориентации спинов параллельно друг другу (ортомолекулы), либо антипараллельно

(парамолекулы). Жидкая вода была экспериментально разделена на орто и пара фазы в неоднородном электрическом поле [Kilaj et al., 2018] (то же для магнитного поля) и могла существовать в таком виде в течение времени около часа. Предполагается, что для льда это время может быть порядка месяца. Наложение спиновых состояний на вариабельность структуры льда Isd из кристаллических модификаций Ih, Ic, 0 должно приводить к дополнительному разнообразию характеристик ледяных структур. Можно также отметить зависимость соотношения концентраций льдов в составе льда Isd от химических особенностей пористых материалов в случае замерзания воды в поровом пространстве [Jazdzewska et al., 2019]. Все эти возможности также указывают на необходимость разработки классификации льда, содержащего хаотическую укладку слоев.

Что касается модели ледяных частиц мезосферных облаков, то предложенная в настоящей работе гипотеза является пока предпосылкой для ее разработки. Очевидно, требуется дальнейшее исследование, в том числе особенностей электромагнитных характеристик льдов в структурах с нарушением укладки Isd.

5. ВЫВОДЫ

1. Показано, что лед 0 может образовываться в структуре атмосферного штабелированного льда Isd. Это следует из лабораторного эксперимента по осаждению паров воды на холодную подложку из льда Ih при температурах ниже $-80...-23^{\circ}\text{C}$. Зародыши кристаллов льда 0 могут длительное время существовать в составе атмосферных образований из льда Ih при температурах до -10°C , что было показано при микроволновых диэлектрических исследованиях выпавшего града. Этот результат находится в согласии с теоретическими исследованиями, выполненными в работе [Leoni et al., 2019].

2. Возникновение электрической проводимости в нанометровых контактных слоях между льдом 0 и другими модификациями льда приводит к изменению электромагнитных характеристик частиц, в том числе из-за плазмонных явлений. Уникальность этих характеристик позволит усовершенствовать методы дистанционного зондирования параметров атмосферы. Примером может быть задача уточнения радиационного баланса земной поверхности, в которой ранее не учитывались особые радиационные характеристики мезосферных облаков. Другой пример — разработка и уточнение переноса радиоволновых излучений в холодных облаках атмосферы.

3. Представляется, что разработка новой классификации природных ледяных структур на основе энтропийных характеристик мезо и микро структур даст количественное описание свойств льда I_{sd} (состоящего из льдов I_h , I_c и льда 0) и лучшее понимание физико-химических явлений в криосфере и атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О.* Пропускание электромагнитного излучения видимого диапазона тонким слоем льда 0, конденсированного на диэлектрическую подложку // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020а. Т. 111. № 5. С. 311–315.
- Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А.* Лёд 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования // Лёд и снег. 2020б. Т. 60. № 2. С. 263–273.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О.* Диэлектрическая проницаемость глубоко переохлажденной воды по данным измерений на частотах 7.6 и 9.7 ГГц // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 3. С. 259–267.
- Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицам. М.: Мир, 1986. 664 с.
- Ефимов В.Б., Изотов А.Н., Левченко А.А., Мексов-Деглин Л.П., Хасанов С.С.* Структурные превращения в ледяных образованиях при низких температурах и малых давлениях // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. Т. 94. № 8. С. 662–667.
- Завитаев Э.В., Юшканов А.А.* Влияние характера отражения электронов на электромагнитные свойства неоднородной сферической частицы // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2004. Т. 126. Вып. 1(7). С. 203–214.
- Котляков В.М., Алексеев В.Р., Волков Н.В., Втюрин Б.И., Гросвальд М.Г., Кренке А.Н., Лосев К.С., Цуриков В.Л., Дюнин А.К., Втюрина Е.А., Канаев Л.А., Перов В.Ф., Донченко Р.В.* Гляциологический словарь. Л.: Гидромеоиздат, 1984. 527 с.
- Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики. М.: Физматлит, 2009. 481 с.
- Ролдугин В.К., Черняков С.М., Ролдугин А.В., Оглоблина О.Ф.* Вариации полярных летних мезосферных отражений во время появления неоднородностей серебристых облаков // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 1–8.
- Харлак Д., Галенко П., Холланд-Мориц Д.* Метастабильные материалы из переохлажденных расплавов. М.-Ижевск: R&C Dynamics, 2010. 482 с.
- Шредингер Э.* Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. М.-Ижевск: НИЦ «РХД», 2002. 92 с.
- Шувалов Л.А., Урусовская А.А., Желудев И.С., Залеский А.В., Семилетов С.А., Гречушников Б.Н., Чистяков И.Г., Пикин С.А.* Современная кристаллография: Т. 4. Физические свойства кристаллов. М.: Наука, 1981. 495 с.
- Allen J.T., Giammanco I.M., Kumjian M.R., Punge H.J., Zhang Q., Groenemeijer P., Kunz M., Ortega K.* Understanding hail in the Earth system // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. P. e2019RG000665.
- Arakawa M., Kagi H., Fernandez-Baca J.A., Chakoumakos B.C, Fukazawa H.* The existence of memory effect on hydrogen ordering in ice: The effect makes ice attractive // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. № 16. P. L16101 (1-49).
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O.* The Possibility of Observing Noctilucent Clouds in Microwave Radiometric Measurements // Proceedings of SPIE, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2019. V. 11208. P. 1120818 (1–5).
- Jazdzewska M., Domin K., Sliwinska-Bartowiak M., Beskrovnyi A.I., Chudoba D.M., Nagorna T.V., Ludzik K., Neov D.S.* Structural properties of ice in confinement // Journal of Molecular Liquids. 2019. V. 283. P.167–173.
- Kokhanovsky A.A.* Microphysical and optical properties of noctilucent clouds // Earth-Science Reviews. 2005. V. 71. P. 127–146.
- Kilaj A., Gao H., Rosch D., Rivero U., Kupper J., Willitsch S.* Observation of different reactivities of para- and ortho-water towards cold diazenylium ions // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 2096(1–24).
- Korobeynikov S.M., Royak M.E., Melekhov A.V. Agoris D.P., Pyrgioti E., Soloveitchik Yu.G.* Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. V. 38. № 6. P. 915–921.
- Leoni F., Russo J.* Nonclassical nucleation pathways in stacking-disordered crystals // Physical Review X. 2021. V. 11. № 3. P. 031006 (1–21).
- Leoni F., Shi R., Tanaka H., Russo J.* Crystalline clusters in mW water: Stability, growth, and grain boundaries // J. Chem. Phys. 2019. V. 151. Iss. 4. P. 044505.
- Libbrecht K.G.* The physics of snow crystals // Reports on Progress in Physics. 2005. V. 68. P. 855–895.
- Murray B.J., Salzmann C.G., Heymsfield A.J., Dobbie S., Neely R.R., Cox C.J.* Trigonal ice crystals in Earth's atmosphere // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. V. 96. № 9. P. 1519–1531.

- Quigley D., Alfe D., Slater B.* On the stability of ice 0, ice i, and Ih // *Jorn. Chem. Phys.* 2014. V. 141. № 16. P. 161102 (1–5).
- Russo J., Romano F., Tanaka H.* New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // *Nature materials.* 2014. V 13. P. 733–793.
- Salzmann C.G.* Advances in the experimental exploration of water's phase diagram // *The Journal of Chemical Physics.* 2019 V. 150. № 6. P. 060901 (1–27).
- Slater B., Quigley D.* Zeroing in on ice // *Nature Mater.* 2014. V. 13. P. 670–671.
- Sliwinska-Bartkowiak M., Jazdzewska M., Huang L.L., Gubbins K.E.* Melting behavior of water in cylindrical pores: carbon nanotubes and silica glasses // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2008. V. 10. P. 4909–4919.
- Varn D.P., Crutchfield J.P.* What did Erwin mean? The physics of information from the materials genomics of aperiodic crystals and water to molecular information catalysts and life // *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences.* 2016. V. 374. P. 20150067 (1–22).

THE SEARCH FOR ICE 0 IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

G. S. Bordonskiy*, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Nedorezova st., 16a, Chita, 672002 Russia

*e-mail: lgc255@mail.ru

In the last decade, it has been shown that in most cases atmospheric ice consists of a mixture of ices Ih and Ic, it is called ice with stacking disorder or stacking disordered ice Isd. In addition, it became known about the existence of another crystalline modification of ice, called ice 0. Ice 0 is a transitional form from deeply supercooled water to ices Ih and Ic, which form at temperatures below -23°C (at low pressures). For this reason, the question arose about the possibility of forming ice 0 in the structure of ice Isd. To clarify the issue, laboratory experiments were carried out to obtain layers of ice 0 on the surface of ice Ih, as well as dielectric measurements of the material of atmospheric ice from fallen hail. The results obtained confirmed the possibility of forming ice 0 in the structure of stacking disordered ice Isd. A special property of such a structure is the appearance of contact layers with high conductivity, which significantly changes the electrophysical characteristics of ice particles. For example, in particles of small sizes, resonances of plasmon oscillations arise, which affect the transfer of electromagnetic radiation in cloud formations. The study of electromagnetic properties of small ice particles containing ice 0, and their features in various areas of the atmosphere will allow solving a number of important tasks. These include refining the radiation balance of the Earth's surface, thunderstorm phenomena, radiation transfer in cloud formations, and physicochemical processes in aerosols and snow covers.

Keywords: ice 0, extinction, ice Isd, ice particles, plasmon resonance