

Аномалии теплового излучения переохлаждённого водного аэрозоля над открытым участком водной поверхности

Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, А. К. Козлов, В. А. Казанцев

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Чита, 672002, Россия
E-mail: lgc255@mail.ru*

Открытие сегнетоэлектрического льда 0, существующего при низком давлении при температуре ниже -23°C , поставило вопрос о его обнаружении в атмосфере и на земной поверхности. Уникальной особенностью льда 0 является возникновение на его контакте с другими диэлектриками сверхтонких высокопроводящих слоёв, на которых возникает сильное рассеяние и поглощение электромагнитного излучения. Этот эффект может возникать из-за появления резонанса плазмонных мод в малых областях ледяных структур, содержащих сегнетоэлектрический лёд 0. В настоящей работе представлены результаты исследований теплового излучения тумана над открытой водной поверхностью оз. Кенон вблизи сброса тёплой воды ТЭЦ-1 в г. Чите. Измерения выполнены с использованием микроволновых радиометров на длинах волн 2,3; 1,35; 0,88 см и ИК-радиометра в диапазоне 8–12 мкм. Осуществляли суточные наблюдения теплового излучения облака тумана при наземной установке приборов и их ориентации под углом $\sim 10\text{--}12^{\circ}$ к горизонтальной плоскости. В зимнее время при сбросе воды в водоём и образовании выраженного облака тумана было обнаружено резкое изменение радиояркостной и радиационной температуры, что связывается с появлением малых ледяных частиц, содержащих лёд 0.

Ключевые слова: туманы, радиояркостная и радиационная температура, плазмонный резонанс

Одобрена к печати: 03.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-364-371

Введение

Длительное время считалось, что для криосферы Земли основной объект для изучения — лёд Ih (гексагональный лёд). Было известно о существовании в земных условиях кубического льда Ic. Его незначительное количество находили в холодных слоях атмосферы, а также в нанопористых средах (Шарков, 2014; Sliwinska-Bartkowiak et al., 2008).

Определённой неожиданностью стало в 2014 г. сообщение об обнаружении при компьютерном моделировании новой высокотемпературной метастабильной модификации льда, существующей при низком давлении при температуре ниже -23°C , названной льдом 0 (Quigley et al., 2014; Russo et al., 2014; Slater, Quigley, 2014). Его элементарная ячейка состоит из 12 молекул воды с пространственной группой $P4_21ncm$ и этот лёд является сегнетоэлектриком.

В последующих работах (Бордонский, Орлов, 2017б; Бордонский и др., 2020) было экспериментально показано существование льда 0 в измерениях экстинкции лазерного излучения при просвечивании тонких диэлектрических пластинок с конденсированными на них парами воды. В микроволновом диапазоне эффект образования сегнетоэлектрического льда обнаружили в эксперименте по существенному возрастанию коэффициента отражения в сантиметровом диапазоне при охлаждении увлажнённого силикагеля с нанометровыми порами ниже -23°C , помещённого в волновод (Бордонский, Орлов, 2017а).

Дальнейшее исследование особенностей льда 0 было выполнено как в лабораторных, так и натурных условиях (Бордонский и др., 2020, 2024а). При лабораторных измерениях показано, что лёд 0 образуется также при осаждении паров воды на поверхность образцов из льда Ih, по резкому падению интенсивности проходящего излучения в видимом диапазоне. Сильную экстинкцию также обнаружили в аналогичных экспериментах в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне. В натурных условиях выполнены эксперименты по измерению

микроволнового излучения Солнца, отражённого от мезосферных облаков (Бордонский и др., 2024б). В них было обнаружено возрастание радиояркости в коротковолновом участке сантиметрового и миллиметрового диапазонов на величину до 25 К при возникновении свечения серебристых облаков в видимом диапазоне.

Для описания изменения электромагнитных характеристик ледяных структур, образовавшихся при температуре ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении 0,1 МПа (нормальном атмосферном давлении), была предложена модель, объясняющая явление возникновением в объекте плазмонных эффектов (Бордонский и др., 2024а, б).

Одна из разновидностей плазмонных эффектов — резонанс поверхностных плазмонных мод, возникающий в нанометровых слоях на поверхности малых проводящих частиц (Борен, Хафмен, 1986). В данном случае проводящий слой возникает на границе сегнетоэлектрического льда 0 и диэлектрической частицы. Такие частицы эффективно взаимодействуют с электромагнитными полями. В случае их неправильной формы рассеяние излучения имеет место до нулевых частот. Можно ожидать, что плазмонные явления происходят в структурах со льдом 0 не только в мезосфере (для серебристых облаков), но и при определённых условиях в стратосфере и тропосфере, включая её самые нижние слои.

Задача настоящей работы заключалась в поиске структур, содержащих лёд 0, в приземной части атмосферы в облаках тумана, образующихся над открытой водной поверхностью. Он появляется при сбросах тёплых вод промышленных предприятий в водоёмы в зимнее время, когда в чистую атмосферу попадают пары воды с последующим формированием переохлаждённых капелек воды. Возникающий переохлаждённый водный аэрозоль поднимается с тёплым воздухом на десятки и сотни метров над поверхностью в область более низкой температуры, где имеются условия образования льда 0, т.е. температура воздуха заметно ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и возможно перенасыщение водяного пара.

Эксперимент

Как отмечалось выше, в работах (Бордонский, Орлов, 2017б; Бордонский и др., 2020, 2024а, б) регистрация льда 0 связывалась с появлением тонких, порядка одного нанометра, слоёв с высокой электропроводностью на границе льда 0 и любого диэлектрика. В атмосфере это могут быть пылевые частицы, в том числе кристаллы льдов Ih и Ic любых размеров. Образующиеся контактные слои с металлической проводимостью имеют отрицательную действительную часть диэлектрической проницаемости $\epsilon' < 0$ с экстремумом вблизи $\epsilon' = -2$ (частота Фрёлиха) (Борен, Хафмен, 1986). При этом эффект имеет место ниже плазменной частоты зарядов контактного слоя $\omega_p = \sqrt{(4\pi n e^2)/m}$, где n — концентрация зарядов; e — заряд частицы плазмы; m — масса частицы. Поэтому появление искомого льда можно ожидать в некоторой области тумана при возникновении в ней благоприятных условий: перенасыщения водяного пара, возникновения глубокого переохлаждения капель тумана, температуры ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Согласно работе (Sun, Tanaka, 2024) лёд 0 может образовываться вблизи поверхности жидких капель воды в начальной стадии образования зародышей льда. Для такого случая можно наблюдать возникновение замерзания тумана в кристаллическое облако, состоящее из частиц льда, и сильного отражения (рассеяния) в некоторых объёмах аэрозоля. Данный процесс должен регистрироваться при микроволновых и радиометрических ИК-измерениях при наземной и аэрокосмической установке измерительной аппаратуры.

Использованная схема измерений представлена на *рис. 1* (см. с. 366). Были выполнены измерения теплового излучения тумана вблизи ТЭЦ-1 г. Читы. Туман образовывался в зимнее время над поверхностью оз. Кенон, куда сбрасывались тёплые воды при функционировании ТЭЦ. Объём облака зависел от температуры воздуха, ветра, массы сброшенной воды и размеров открытой водной поверхности.

Радиометрические приёмники (см. *рис. 1*, «2») регистрировали сумму нескольких компонент, например, для микроволнового излучения радиояркостную температуру можно представить в виде трёх слагаемых:

$$T_B = \alpha T_S + \kappa T_0 + \gamma T_f, \quad (1)$$

где α — коэффициент пропускания облака; κ — коэффициент излучения; γ — коэффициент отражения от облака фонового излучения, вызванный рассеянием. В случае достаточно быстрого возникновения слоя (см. рис. 1, «4») со льдом 0 можно ожидать скачка T_B из-за возрастания κ и γ . Скорость нарастания T_B будет определяться динамикой возникновения льда 0, т.е. его массой и процессом перекрытия диаграммы направленности антенн аномальной области облака. Для радиационной температуры в тепловом ИК-диапазоне вид формулы аналогичен (1).

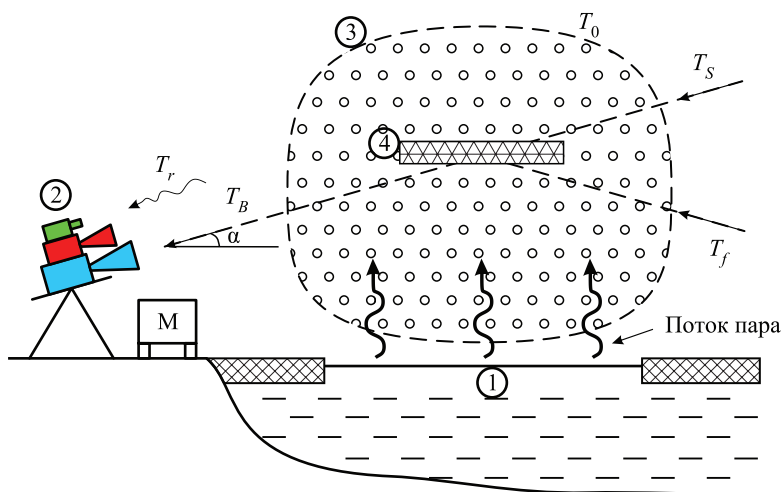


Рис. 1. Схема установки для поиска льда 0 в тумане. 1 — полынья в ледяном покрове, 2 — комплекс микроволновых и ИК-радиометров, 3 — облако жидких частиц тумана, 4 — ожидаемый спорадический слой твердых частиц со льдом 0, T_B — измеряемая радиояркостная температура, T_S — температура излучения неба в направлении антенн радиометров, T_f — яркостная температура микроволнового фонового излучения из нижнего пространства, T_r — радиационная температура тумана в ИК-диапазоне, М — метеостанция, T_0 — термодинамическая температура облака, α — угол зондирования

В эксперименте использовали микроволновые радиометры на длины волн 2,3; 1,35; 0,88 см и ИК-радиометр на интервал длин волн 8–12 мкм. Чувствительность микроволновых радиометров $\sim 0,1$ К, ИК-радиометра $\sim 0,05$ К при постоянной времени 1 с. Калибровку приборов осуществляли при помощи небольших эталонов чёрного тела при двух различных значениях термодинамической температуры с точностью порядка 1 К.

Измерения выполнялись эпизодически в январе — феврале 2024–2025 гг. при характерной температуре приземного воздуха $-20...-35$ °С на расстоянии от центра облака ~ 300 м. Угол зондирования выбирали вблизи $10-12^\circ$. С учётом диаграмм направленности антенн и объектива ИК-радиометра сигнал принимали с области тумана в центре облака с размерами ~ 50 м. Оси антенн совпадали в пространстве в пределах 2° .

Результаты эксперимента

Один из результатов измерений, когда исследуемое облако тумана достигало места установки аппаратуры 19.01.2024, представлен на рис. 2 (см. с. 367). Графики сильно загроулены из-за значительной величины наблюдаемого эффекта изменения температуры излучения.

При анализе полученных результатов на графиках рис. 2 можно отметить резкое падение сигналов радиометров после 11:22 (время местное), особенно на длине волны 0,88 см, где уменьшение T_B составило ~ 60 К. Наименьший скачок радиационной температуры регистрировали в ИК-диапазоне — ~ 7 К.

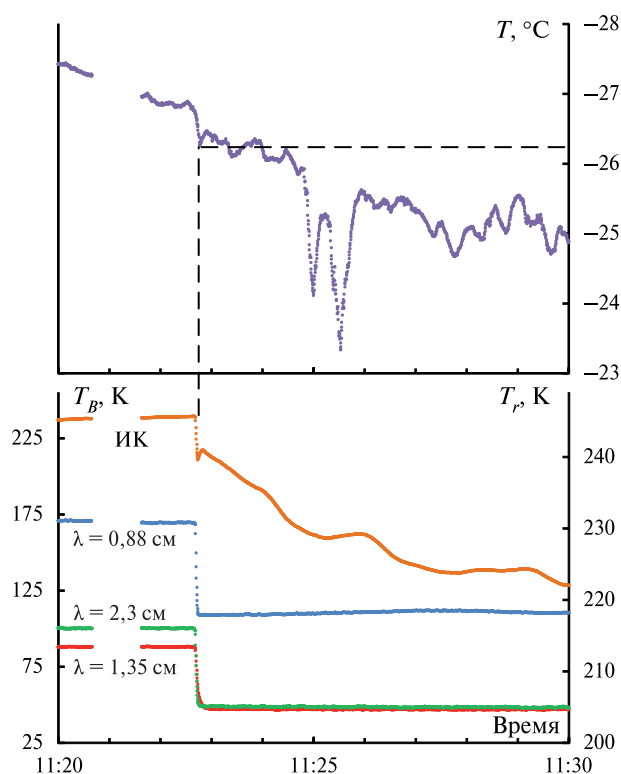


Рис. 2. Зависимость радиационной температуры тумана T_r в ИК-диапазоне и радиояркостной температуры T_f для трёх длин волн, а также температура приземного воздуха вблизи земной поверхности T на месте установки метеостанции

Эффект наблюдали, когда температура приземного воздуха возрастала от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в начале измерений до $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. При последующем росте температуры отмечалось уменьшение радиационной температуры на 20 K за время ~ 40 мин. Это уменьшение определилось ослаблением тумана, что наблюдалось визуально. Радиояркостная температура на трёх длинах волн при этом практически не изменялась, что указывает на низкое значение интегрального затухания в слое исследуемого тумана и его водности.

Причина такой аномалии может быть связана с резким изменением α , κ и γ , определяемыми температурной эволю-

цией содержания льда 0 в объёме облака тумана. Резкость перехода и близость температуры к $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ указывают на возникновение в облаке фазового перехода льда 0 в лёд $1h$ в некоторой достаточно узкой горизонтальной области облака, где возникают необходимые условия. По-видимому, лёд 0 образовался в аэрозольных частицах в ночное время, когда он появился в жидкой среде при её замерзании (или конденсации водяного пара на кристалликах льда $1h$ и на частицах пыли). Какие-либо другие известные явления с фазовыми превращениями воды в туманах при его нагревании от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые могли бы вызвать наблюдаемые особенности T_f и T_r , в настоящее время не известны. Температура в тумане может быть несколько отлична от измеренной вблизи пункта наблюдения, что вполне возможно из-за нагревания верхнего слоя облака солнечным излучением. То же по отношению к значению температуры фазового превращения, которая может слабо изменяться в зависимости от условий образования льда 0 и химических особенностей частиц, на которые он осаждался. Возможен также некоторый гистерезис температуры таяния и замерзания из-за сегнетоэлектрических свойств льда 0 .

Из представленных наблюдений, полученных при безоблачной земной атмосфере, следует, что появление областей тумана со льдом 0 приводит при наземных измерениях к существенному возрастанию T_f из-за отражения (рассеяния) излучения земной поверхности от исследуемого объекта и возможного возрастания собственного излучения, т.е. увеличения κ и γ .

Обсуждение результатов

Всего для выполнения радиометрических измерений выполнено восемь выездов, из них три включали суточные измерения. В некоторых случаях были обнаружены необычные отклонения измеренных величин, которые можно объяснить возникновением областей тумана со льдом 0 . Представленные выше измерения с резкими изменениями яркости (см. рис. 2) связаны с событием, когда туман охватывал относительно большую область (диаметром ~ 1000 м и высотой от земной поверхности 150 м), что было, по-видимому, связано с повышенным выбросом тёплой воды с ТЭЦ-1 и отсутствием ветра. В большинстве случаев ветер существенно ухудшал условия наблюдения из-за рассеяния облака тумана.

Также представляется, что задача наблюдения аномалий радиационных характеристик холодных туманов может эффективно решаться при аэрокосмических измерениях разнообразных природных и искусственных объектов, таких как туманов на реках, перекрытых плотинами; облаков вблизи крупных полыней, например, в северных морях; взаимодействующих атмосферных фронтов и т.п. Оценим в первом приближении возможности микроволновой радиометрии для решения данной задачи при аэрокосмических измерениях. Радиояркостную температуру на входе радиометров в этом случае можно представить в виде:

$$T_B = RT_S + \kappa T_0 + T_f L(1 - R)^2, \quad (2)$$

где R — коэффициент отражения от границы с облаком тумана; L — коэффициент передачи мощности излучения в облаке вдоль направления измерений.

В формулу (2) введён коэффициент отражения R , который для однородного облака близок к нулю. Однако при появлении неоднородностей с резко отличающимися характеристиками R на границах облака тумана становится отличным от нуля. Учёт R потребует при оценке приращений яркостной температуры.

Определить теоретически κ , R , L в настоящее время сложно из-за отсутствия характеристик тумана со льдом 0. Для оценки ΔT_B используем следующее соображение. Если вклад от рассеяния существенно превышает собственное излучение и $R \rightarrow 1$, то ΔT_B будет определяться первым членом в выражении (2). При этом $T_B \rightarrow T_S$, которая для безоблачной холодной атмосферы на использованных длинах волн при измерениях вблизи надир меньше 10 К. В таком случае ΔT_B составит значение ~ 200 К. Общий интервал уменьшения ΔT_B будет находиться в пределах приблизительно от 0 до 200 К во всех случаях и определяться структурой ледяных образований изо льда 0, его концентрацией и температурой T_0 и T_f .

Таким образом, при аэрокосмических наблюдениях можно ожидать понижения радиояркостной температуры облака, в отличие от наблюдений с земной поверхности, когда образование областей с сегнетоэлектрическим льдом 0 приводит к увеличению яркости исследуемого объекта. Для наблюдений в ИК-диапазоне должна проявляться та же тенденция, однако перепады радиационной температуры должны иметь меньшую величину из-за существенно более высоких значений T_S . При этом для более точной оценки ΔT_f по спектру в ИК-диапазоне требуется специальный анализ.

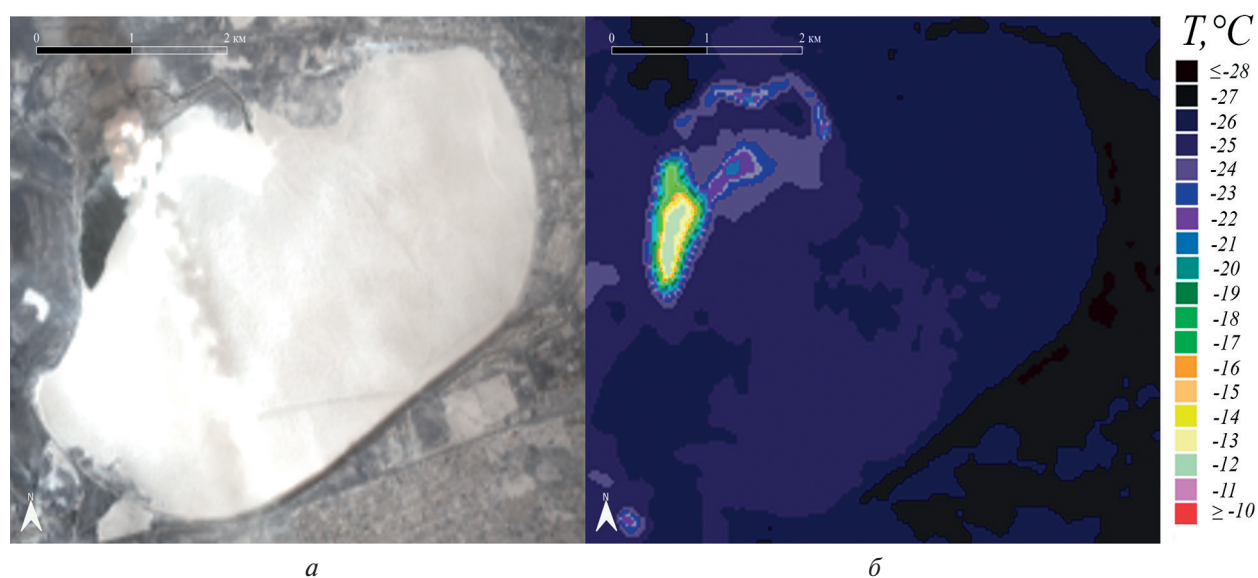


Рис. 3. Космоснимки Landsat-8 района открытой воды оз. Кенон:
а — в видимом диапазоне; б — в инфракрасном диапазоне. 16 января 2022 г.

В качестве примера на рис. 3 приведены космоснимки Landsat-8 района открытой воды оз. Кенон в видимом и инфракрасном диапазоне в январе 2022 г. Данные получены с веб-

сервиса Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey, <http://earth-explorer.usgs.gov>). На снимках обнаруживается участок вблизи ТЭЦ-1 с температурой значительно ниже, чем температура открытой водной поверхности: $-14...-16^{\circ}\text{C}$. Возник вопрос — является ли облако тумана аэрозолем с переохлаждёнными жидкими частицами или проявляются необычные особенности электромагнитного поведения некоторой части холодных частиц. Облако водного аэрозоля имело высоту до 150 м над уровнем водной поверхности, которая уменьшалась до ~ 30 м в дневное время. Тогда же были выполнены микроволновые (на длине волны 0,88 см) и ИК-измерения с земной поверхности. Были выявлены существенные изменения радиояркостной и радиационной температуры излучения с 10:00 до 13:00 при росте приземной температуры от -30 до -23°C . Однако небольшой набор данных не позволил сделать однозначных выводов о причинах сильных изменений температуры излучения. В любом случае из последнего примера ясно, что водный аэрозоль вблизи открытой водной поверхности может охлаждаться до температуры, ниже температуры фазового перехода переохлаждённой воды в лёд 0. Данный эффект отмечается и в работах других авторов. Например, в Гренландии, по данным работы (Cox et al., 2019), самые холодные жидкокапельные туманы образуются при температуре, приближающейся к -40°C . При этом было обнаружено, что иногда наблюдали существенное повышение радиационного воздействия на температуру поверхности с её возрастанием на 5°C . Этот результат косвенно подтверждает возможность образования слоёв тумана со льдом 0.

Выводы

1. Выполнено исследование возможности появления в нижних слоях атмосферы метастабильного сегнетоэлектрического льда 0, который может образовываться в туманах при атмосферном давлении при температуре ниже -23°C . По ранее существовавшим представлениям в таких условиях мог образовываться только гексагональный лёд Ih и, в незначительных количествах, лёд Ic.
2. Наличие у льда 0 сегнетоэлектрических свойств приводит к возникновению на его контакте с диэлектриком, в том числе со льдом Ih, сверхтонкого высокопроводящего слоя с металлической проводимостью. В таком слое при его взаимодействии с электромагнитными волнами возникает плазмонный резонанс, который приводит к существенному рассеянию и поглощению электромагнитного излучения. Например, при конденсации льда 0 на поверхность частиц мезоскопических и микронных размеров возникнет резонанс поверхностных плазмонных мод. В случае частиц неправильной формы рассеяние наблюдается от оптических до нулевых частот. Предполагается, что свечение мезосферных облаков связано с образованием таких частиц.
3. В настоящем исследовании радиометрических характеристик приземного тумана, образованного сбросом тёплых вод в водоём-охладитель в зимнее время, в микроволновом диапазоне и тепловом ИК-диапазоне обнаружено резкое изменение температуры излучения облака тумана, достигшее на длине волны 0,88 см 60 К. Полученный результат впервые подтвердил возможность появления льда 0 в приземных слоях атмосферы.

Литература

1. Бордонский Г. С., Орлов А. О. (2017а) Поиски сегнетоэлектрических льдов в пористых средах в земных условиях // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 45–54. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(45-54).
2. Бордонский Г. С., Орлов А. О. (2017б) Признаки возникновения льда «0» в увлажнённых нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. 2017. Т. 105. № 7–8. С. 483–488. DOI: 10.7868/S0370274X17080045.
3. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О. Пропускание электромагнитного излучения видимого диапазона тонким слоем льда 0, конденсированного на диэлектрическую подложку

- // Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики. 2020. Т. 111. № 5–6(3). С. 311–315. DOI: 10.31857/S0370274X20050070.
4. Бордонский Г. С., Казанцев В. А., Козлов А. К. (2024а) Поиски льда 0 в земной атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 6. С. 968–976. DOI: 10.31857/S0002351524060089.
 5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Казанцев В. А. (2024б) Предполагаемый механизм свечения мезосферных облаков // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69. № 4. С. 307–315. DOI: 10.31857/S0033849424040013.
 6. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
 7. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: Физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
 8. Cox C. J., Noone D. C., Berkhammer M. et al. Supercooled liquid fogs over the central Greenland Ice Sheet // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. P. 7467–7485. DOI: 10.5194/acp-19-7467-2019.
 9. Quigley D., Alfè D., Slater B. Communication: On the stability of ice 0, ice i, and I_h // J. Chemical Physics. 2014. V. 141. No. 16. Article 161102. 5 p. DOI: 10.1063/1.4900772.
 10. 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. DOI: 10.1038/nmat3977.
 11. Slater B., Quigley D. Zeroing in on ice // Nature Mater. 2014. V. 13. P. 670–671. DOI: 10.1038/nmat4017.
 12. Sliwinski-Bartkowiak M., Jazdzewska M., Huang L. L., Gubbins K. E. Melting behavior of water in cylindrical pores: carbon nanotubes and silica glasses // Physical Chemistry Chemical Physics. 2008. V. 10. No. 32. P. 4909–4919. DOI: 10.1039/b808246d.
 13. Sun G., Tanaka H. Surface-induced water crystallisation driven by precursors formed in negative pressure regions // Nature Communications. 2024. V. 15. Article 6083. 10 p. DOI: 10.1038/s41467-024-50188-1.

Anomalies of thermal radiation from supercooled water aerosol over an open water surface

G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov, A. K. Kozlov, V. A. Kazantsev

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita 672002, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru*

The discovery of ferroelectric ice 0, which exists at low pressures at temperatures below $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, has raised the problem of its detection in the atmosphere and on the Earth's surface. A unique feature of ice 0 is the formation of ultra-thin highly conductive layers at its contact with other dielectrics, where strong scattering and absorption of electromagnetic radiation occurs. This effect may arise due to the emergence of plasmonic mode resonances in small regions of ice structures containing ferroelectric ice 0. This paper presents the results of studies on the thermal radiation of fog over the open water surface of Lake Kenon near the warm water discharge from Chita-1 Power Plant. Measurements were carried out using microwave radiometers at wavelengths of 2.3, 1.35, 0.88 cm and an IR radiometer in the range of 8–12 μm . Daily observations of thermal radiation from the fog cloud were conducted with ground-based instrument setups oriented at an angle of approximately $10\text{--}12^{\circ}$ to the horizontal plane. In winter, during water discharge into the reservoir and formation of a pronounced fog cloud, a sharp change in brightness temperature and radiation temperature was observed, which is associated with the appearance of small ice particles containing ice 0.

Keywords: fogs, radio brightness temperature, radiation temperature, plasmon resonance

Accepted: 03.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-364-371

References

1. Bordonskiy G. S., Orlov A. O. (2017a), The search for ferroelectric ice in porous media on the Earth, *Earth's Cryosphere*, 2017, V. 21, No. 6, pp. 39–47, DOI: 10.21782/EC1560-7496-2017-6(39-47).

2. Bordonskiy G.S., Orlov A.O. (2017b), Signatures of the appearance of ice 0 in wetted nanoporous media at electromagnetic measurements, *JETP Letters*, 2017, V. 105, No. 8. pp. 492–496, DOI: 10.1134/S0021364017080021.
3. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Transmittance of electromagnetic radiation of the visible range by a thin film of ice 0 condensed on a dielectric substrate, *JETP Letters*, 2020, V. 111, No. 5, pp. 278–281, DOI: 10.1134/S0021364020050070.
4. Bordonskiy G.S., Kazantsev V.A., Kozlov A.K. (2024a), The search for ice 0 in the Earth's atmosphere, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, V. 60, No. 6, pp. 706–713, DOI: 10.1134/S0001433824700646.
5. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Kazantsev V.A. (2024b), The proposed mechanism of the glow of mesospheric clouds, *J. Communications Technology and Electronics*, 2024, V. 69, No. 4, pp. 307–315 (in Russian), DOI: 10.31857/S0033849424040013.
6. Bohren C., Huffman D., *Absorption and scattering of light by small particles*, New York: John Wiley and Sons, 1983, 544 p.
7. Sharkov E.A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy: v 2 t.* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations: in 2 v.), V. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 544 p. (in Russian).
8. Cox C.J., Noone D.C., Berkelhammer M. et al., Supercooled liquid fogs over the central Greenland Ice Sheet, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, V. 19, pp. 7467–7485, DOI: 10.5194/acp-19-7467-2019.
9. Quigley D., Alfè D., Slater B., Communication: On the stability of ice 0, ice i, and I_h , *J. Chemical Physics*, 2014, V. 141, No. 16, Article 161102, 5 p., DOI: 10.1063/1.4900772.
10. 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, pp. 733–793, DOI: 10.1038/nmat3977.
11. Slater B., Quigley D., Zeroing in on ice, *Nature Mater*, 2014, V. 13, pp. 670–671, DOI: 10.1038/nmat4017.
12. Sliwinska-Bartkowiak M., Jazdzewska M., Huang L. L., Gubbins K. E., Melting behavior of water in cylindrical pores: carbon nanotubes and silica glasses, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2008, V. 10, No. 32, pp. 4909–4919, DOI: 10.1039/b808246d.
13. Sun G., Tanaka H., Surface-induced water crystallisation driven by precursors formed in negative pressure regions, *Nature Communications*, 2024, V. 15, Article 6083, 10 p., DOI: 10.1038/s41467-024-50188-1.