

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 538.956

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ СВЕЧЕНИЯ МЕЗОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ

© 2024 г. Г. С. Бордонский*, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, В. А. Казанцев

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН,
ул. Недорезова, 16А, Чита, 672014 Российская Федерация*

**E-mail: lgc255@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принята к публикации 25.11.2023 г.

Рассмотрен вопрос о физическом механизме рассеяния электромагнитного излучения мезосферными (серебристыми) облаками. Высказана гипотеза об особых электромагнитных характеристиках ледяных частиц нанометровых размеров, составляющих мезосферные облака. Ледяные частицы состоят из недавно открытой кристаллической модификации воды — льда 0, образованного при конденсации паров на пылевых частицах при температурах $-140\dots-23^\circ\text{C}$. Лед 0 является сегнетоэлектриком, и при контакте его с диэлектриком образуется слой с высокой электропроводностью. Из-за плазмонного резонанса в наноразмерных слоях возникает сильное рассеяние электромагнитного излучения в широком интервале частот. Этот механизм обуславливает свечение серебристых облаков при подсветке их излучением Солнца.

Ключевые слова: серебристые облака, лед 0, плазмоны, рассеяние электромагнитного излучения

DOI: 10.31857/S0033849424040013, **EDN:** JSHGWK

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в полярных районах в мезосфере на высотах 80...90 км все чаще образуются облака, называемые серебристыми облаками [1–3]. Они очень тусклые и разряженные, их можно наблюдать только в сумерках, перед восходом или закатом, когда облака нижней атмосферы находятся в тени, а серебристые облака освещены Солнцем [4]. Лучше всего их видно, когда Солнце находится между 6° и 16° ниже горизонта. Образование серебристых облаков связано с конденсацией льда на частицах вулканической и метеорной пыли, а также кристалликах морской соли при температурах ниже -100°C . Эти частицы рассеивают солнечную радиацию и создают свечение в видимом участке спектра. Возможно, серебристые облака образуются в атмосфере Марса и создают рассеяние излучения вплоть до ультрафиолетового диапазона (<https://www.space.com/2812-mars-clouds-higher-earth.html>, <https://www.nasa.gov/press-release/goddard/2020/mars-nightglow>). Считается, что эти облака являются предвестниками изменения климата, вызванного антропогенными и естественными факторами [5, 6].

Обращают на себя внимание необычные характеристики серебристых облаков. Размер слагающих их частиц довольно мал и составляет величину порядка десятков нанометров, их плотность

в единице объема крайне незначительна (10 нг/м^3), однако было обнаружено отражение излучения низкочастотных радаров от мезосферных облаков на частотах от единиц мегагерц до одного гигагерца [7, 8]. Несмотря на относительно высокую мощность радаров (порядка десятков киловатт), регистрируемое отражение радиолокационных сигналов от серебристых облаков возможно представить только в том случае, если частицы и состоящие из них слои имеют металлические свойства. Высказывалось мнение, что частицы льда могут быть покрыты тонкой металлической пленкой из натрия или железа [8]. Однако это объяснение является спорным [9]. Отметим отсутствие аналогичного рассеяния сигналов облаками стратосферы.

Пока нет ответа на вопрос о появлении воды в мезосфере на высотах 80...90 км, где атмосферное давление падает до значения 10^{-2} мм рт. ст. Предполагается, что образование воды связано с ростом концентрации метана в атмосфере [1, 10]. Разрабатывалась гипотеза о влиянии солнечной радиации (ядер атома водорода) на химические реакции с образованием воды. Этот эффект исследовался в январе 2005 г., когда наблюдалось увеличение потока протонов, однако было обнаружено не увеличение, а уменьшение частоты появления серебристых облаков [11]. В результате был сделан вывод, что исчезновение серебристых облаков было связано с повышением их температуры. Другая

гипотеза объясняет образование воды ее хемосинтезом в порах силикатных материалов при охлаждении до -45°C и взаимодействии их поверхности с водородом [12]. Водород может либо выделяться из глубин Земли, либо иметь антропогенное происхождение [13, 14].

Новая гипотеза. Для объяснения аномалий радиочастотных и оптических характеристик серебристых облаков нами было высказано предположение [15], что на поверхности диэлектрических частиц нанометровых размеров конденсируется особая кристаллическая модификация воды — лед 0, обладающая сегнетоэлектрическими свойствами [16–18]. Такие частицы приобретают металлическую проводимость. В случае анизотропии формы они создают сильное рассеяние падающего излучения в широком диапазоне частот, включая микроволновую область спектра [19].

Цель данной работы — уточнить теоретическое обоснование и экспериментально подтвердить высказанную гипотезу. Для этого требуется:

- 1) обобщить имеющиеся экспериментальные данные и выполнить новые лабораторные измерения электромагнитных характеристик тонких слоев льда 0 в ИК-диапазоне, конденсированного на поверхность диэлектрических материалов, в том числе из гексагонального льда, Ih;
- 2) уточнить методику использования микроволновой радиометрической техники для обнаружения серебристых облаков;
- 3) выполнить натурные измерения отраженного от серебристых облаков радиотеплового излучения Солнца в коротковолновом участке микроволнового диапазона.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИПОТЕЗЫ

В работах [16–18] сообщалось об открытии новой кристаллической модификации воды — льда 0, который образуются из глубоко переохлажденной воды при температурах ниже -23°C и низких давлениях. В [18] удалось экспериментально показать, что этот лед может образовываться при конденсации водяного пара (возможно, при переходе пар–жидкая пленка воды–лед 0). Интересным свойством льда 0 является то, что он оказался сегнетоэлектриком, это позволило предложить метод его поиска по электромагнитным характеристикам [18]. Из работ [20, 21] было известно, что на границе раздела диэлектрика и сегнетоэлектрика образуется тонкий слой толщиной ~ 1 нм с электропроводностью приблизительно на шесть порядков выше, чем для контактирующих сред. Это особенность была использована для детектирования образования льда 0. Кроме того, было известно, что малые проводящие частицы нанометровых размеров

могут весьма сильно рассеивать и поглощать электромагнитные волны [19]. Эффект связан с возникновением поверхностных электромагнитных мод, для которых экстремум поглощения и рассеяния достигается для значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала частицы $\epsilon = -2\epsilon_m$ (ϵ_m — диэлектрическая проницаемость окружающей среды). Это следует из формул для факторов эффективности поглощения и рассеяния сферических частиц в электростатическом приближении [19]. Например, для фактора поглощения в воздушной среде, для которой $\epsilon_m = 1$, имеем

$$Q_{\text{полг}} = 12x\epsilon'' / [(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2],$$

где x — дифракционный параметр, равный Ka (K — модуль волнового числа, a — радиус частицы). Частота излучения, для которой $\epsilon' = -2$ называется частотой Фрелиха. Те же особенности поглощения и рассеяния имеют место для частицы с проводящей оболочкой. Для такого случая происходит некоторый сдвиг частоты Фрелиха. С увеличением размера частиц эта частота сдвигается в сторону более длинных волн. Важным является то, что анизотропные частицы могут намного сильнее рассеивать излучение, чем сферические частицы, особенно в низкочастотном участке спектра, вплоть до нулевых частот.

Особенность льда 0 заключается в том, что он образуется только при температурах ниже -23°C . Такие условия для конденсации паров воды и образования льда 0 возникают в мезосфере. Сами пары воды образуются при химических превращениях и имеют достаточно низкую температуру, необходимую для возникновения льда 0.

Таким образом, анизотропные диэлектрические частицы, покрытые сегнетоэлектрическим льдом и образующиеся при температурах $-23...-140^{\circ}\text{C}$, могут создавать свечение облаков в мезосфере как в видимом, так и в более низкочастотных диапазонах. Сильное рассеяние возникает ниже плазменной частоты проводящих слоев ледяных частиц, так как для них значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости имеет отрицательное значение. Эти факторы определяют величину эффекта. Например, если плазменная частота сдвигается в длинноволновую ИК-область спектра, то рассеяние не будет наблюдаться в видимом диапазоне, а только в радиоволновом диапазоне, что наблюдали в [7].

2. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Видимый диапазон

В [23] были выполнены прямые измерения прохождения излучения в видимом диапазоне через пленку льда 0 нанометровой толщины, конденсированной на прозрачную подложку из диэлектрика. Для получения сверхтонкой пленки в данной работе был использован специальный прием конденсации водяного пара на охлажденную подложку. Для этого камеру, ограниченную стенками из полиэтиленовой пленки, заполняли холодными парами азота с последующим прекращением подачи охлаждающего газа и нагреванием камеры при температуре лабораторного помещения окружающим воздухом. При таком процессе вода, захваченная периферийными деталями камеры и ее стенками, переходила при нагревании в газообразную фазу и диффундировала в центральную область установки. В этой области установки давление паров воды было ниже, чем на периферии камеры, и происходила конденсация на более холодной подложке. Один из полученных результатов измерений для излучения на длине волны 0.52 мкм представлен на рис. 1.

Как следует из рис. 1 наблюдается сильное уменьшение проходящей мощности излучения в области температур $-70...-20^{\circ}\text{C}$ при прекращении подачи газообразного азота и нагревании образца. Близкие результаты были получены для других материалов подложки, однако, например, для монокристалла NaCl интервал уменьшения проходящей мощности был заметно больше и составлял $-120...-20^{\circ}\text{C}$. Выполненные в [22] эксперименты показали хорошее совпадение с ожидаемыми теоретическими оценками.

Представляет большой интерес установить возможность образования льда 0 на поверхности

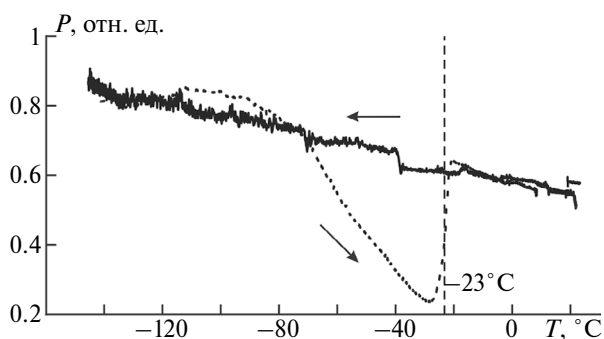


Рис. 1. Зависимость проходящей мощности лазерного излучения через пластинку из кварцевого стекла от ее температуры в цикле охлаждение–нагревание [22]: штриховая вертикальная линия — температура фазового перехода переохлажденной воды и льда 0, стрелки — направление процесса изменения температуры во времени.

образцов изо льда Ih. Для этой цели в новых измерениях в качестве подложки использовали образец из ледяной пластинки толщиной порядка единиц миллиметра. В выполненном эксперименте было также обнаружено ослабление проходящего излучения, аналогичное приведенному на рис. 1. Этот эксперимент интересен тем, что недавно был обнаружен “стековый” лед (или штабелированный лед) [23], который состоит из чередующихся слоев гексагонального льда Ih и кубического Ic. Поэтому естественно ожидать, что лед 0 будет при определенных условиях появляться и в чисто ледяных структурах при чередовании со слоями изо льдов Ih и Ic.

2.2. Измерения в ИК-диапазоне

Данные эксперименты важны для подтверждения теоретических представлений о широком интервале экстинкции анизотропных проводящих наночастиц [19]. Измерения в тепловом ИК-диапазоне были выполнены по методике, аналогичной измерениям в [22] для видимого диапазона. В качестве излучателя использовали галогеновую лампу, а в качестве приемника — чувствительный модуляционный радиометр на пироэлектрическом детекторе в диапазоне 7...14 мкм. Чувствительный детектор был необходим для снижения мощности излучения лампы, чтобы исключить нагревание поверхности образца. Исследовали образцы с подложками из хлорида натрия и других диэлектрических материалов. Во всех случаях наблюдали температурные зависимости пропускания, аналогичные графикам рис. 1. Один из результатов приведен на рис. 2.

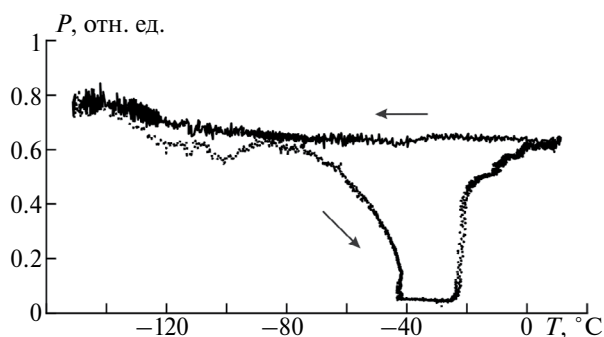


Рис. 2. Мощность инфракрасного излучения, прошедшего через образец из слюды, в цикле охлаждение–нагревание.

2.3. Исследование в микроволновом диапазоне

Исследования в микроволновом диапазоне выполнены по другой методике, представленной в [18]. Измерения были проведены при заполнении увлажненным силикатным сорбентом SBA-15 прямоугольного волновода. В эксперименте жидкая вода находилась в порах среды нанометровых

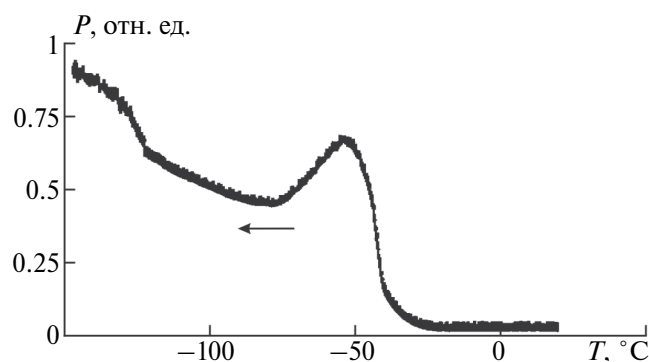


Рис. 3. Зависимость проходящей мощности излучения через увлажненный SBA-15 на частоте 94 ГГц в процессе охлаждения среды; весовая влажность сорбента 120%.

размеров, что позволило достичь ее глубокого переохлаждения [24]. Измеряли прошедшую через образец мощность излучения на частоте 94 ГГц (рис. 3).

Как следует из рис. 3, вымерзание воды в порах сорбента началось при температуре ниже -30°C . При этом обнаружено отклонение от монотонности изменения графика проходящей мощности при температурах от -30 до -120°C , что указывает на возникновение дополнительного затухания, вместо его монотонного понижения при непрерывном замерзании воды. Эти результаты можно объяснить образованием льда 0 в пористых средах и его влиянием на экстинкцию в рамках рассмотренного выше представления о рассеянии (поглощении) анизотропными наноразмерными структурами с высокой электропроводностью.

3. МЕТОДИКА МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Лабораторные измерения отражения и затухания электромагнитного излучения при образовании тонкого слоя льда 0 на подложке или в поровом пространстве силикатных сорбентов в определенной степени подтверждают гипотезу о механизме рассеяния излучения серебристыми облаками. Эффект роста затухания наблюдали в видимом, инфракрасном и миллиметровом диапазонах.

Для определения величины эффекта в природных условиях, при образовании серебристых облаков, начаты его радиометрические измерения в коротковолновом участке микроволнового диапазона на частотах 20...125 ГГц. Основная помеха при измерениях связывается с вариациями пропускания более низких слоев атмосферы и, прежде всего, тропосферы. Поэтому использовалась методика измерения приращения радиояркостной температуры при визуальном отсутствии облачности, а также в промежутке времени, когда происходит наибольшая подсветка мезосферных облаков

после заката, через 50 мин и в интервале ± 15 мин. При этом слабые облачные образования в тропосфере и стратосфере не подсвечиваются, т.е. не рассеивают излучение Солнца. Очевидно, что наблюдения приращений радиояркостной температуры $\Delta T_{\text{я}}$, связанных с серебристыми облаками, будут успешными, если изменение собственного излучения слоев безоблачной атмосферы не будет превосходить значения этого приращения.

Точное значение спектральной интенсивности рассеянного излучения электропроводящих анизотропных наночастиц требует специальных расчетов в конкретных случаях. В настоящее время электрические и геометрические характеристики мезосферных ледяных частиц точно не известны. Однако можно ожидать, что спектральное отношение интенсивности рассеянного излучения на проводящих анизотропных наночастицах имеет значение порядка единицы (в соответствии с данными [19] для использованных в эксперименте частот). Следовательно, важным критерием обнаружения серебристых облаков и подтверждения выдвинутой гипотезы о влиянии льда 0 на рассеяние анизотропными диэлектрическими частицами являются близкие значения одновременных приращений радиояркостной температуры на различных длинах волн микроволнового диапазона, отличающихся друг от друга в 3–5 раз.

Отмеченные особенности позволяют применить выделение искомого сигнала путем усреднения приращений $\Delta T_{\text{я}}$ различных частотных каналов. При этом отношение полезного сигнала к помехам возрастает. Возможен также случай возникновения приращения отраженного сигнала в микроволновом диапазоне и его отсутствие в видимом диапазоне при понижении плазменной частоты в проводящих слоях рассеивающих частиц.

4. НАТУРНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Поиски отраженного радиотеплового излучения проводились с 2019 по 2022 гг. в летние месяцы. Наблюдения осуществляли с аппаратурой, установленной на отрогах Яблонового хребта на высоте 940 м от уровня моря в 30 км от г. Чита (52° с.ш., $113^{\circ}30'$ з.д., Россия, Забайкальский край), при ориентации антенн на северо-запад. В различные годы использовали длины волн 2.3, 1.5, 0.88, 0.3 и 0.24 см; ширина диаграмм направленности антенн $\sim 1...3^{\circ}$; направления осей антенн радиометров совпадали в пределах 2 град. Флуктуационный порог чувствительности радиометров для длин волн 0.3...2.4 см не хуже 0.2 К, а для длины волны 0.24 см — 0.5 К при времени интегрирования 4 с. Точность абсолютных измерений приращения радиояркостной температуры 1 К.

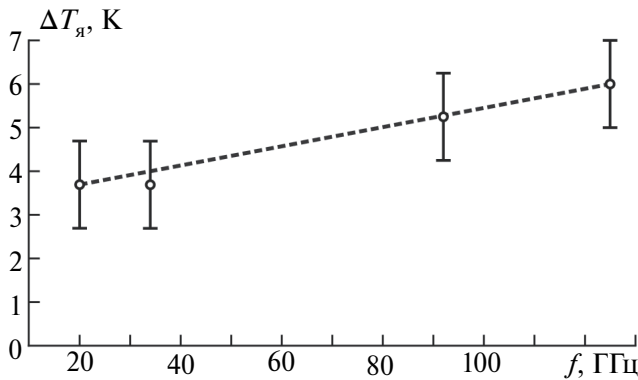


Рис. 4. Зависимость приращения радиояркой температуры от частоты через 50 мин после захода Солнца, 27.08.2019 г.

Наблюдения проводили в дни с незначительной облачностью. Отличить появление серебристых облаков от облачных образований в тропосфере и стратосфере, как отмечено выше, можно по приблизительно одинаковым приращениям радиояркой температуры на различных длинах волн. Для облачных образований в тропосфере приращение радиояркой температуры для коротковолнового участка спектра по сравнению с длинноволновым значительно больше. Такие случаи исключали из рассмотрения.

В один из дней 2019 г. удалось зафиксировать возрастание радиояркой температуры на близкие значения во всех четырех каналах. Приблизительно через 50 мин после захода Солнца радиояркая температура на всех частотах возросла примерно на 4...6 К (рис. 4).

Для более четкого выделения сигнала от серебристых облаков был использован способ суммирования сигналов в четырех каналах, представленных на рис. 4. Среднее значение было найдено по формуле

$$\langle \Delta T_{я} \rangle = \sum (\Delta T_{я})_i / 4, \text{ при } i = 1...4.$$

График $\langle \Delta T_{я} \rangle$ приведен на рис. 5, он позволяет более точно установить время появления и длительность эффекта. Начало возрастания $T_{я}$ наблюдали через 20 мин после захода Солнца, а прекращение — приблизительно через 1 ч. Максимум приращения наблюдали через 50 мин после захода Солнца. В это время подсветка тропосферы и стратосферы отсутствовала. Видеокамерой зарегистрировать выраженное проявление серебристых облаков не удалось, возможно, из-за их низкой яркости в конце августа.

При измерениях в 2021 г. 3 июня удалось при безоблачной тропосфере и стратосфере наблюдать структурированные серебристые облака с резкой границей, отделяющей темную область от светлой (рис. 6).

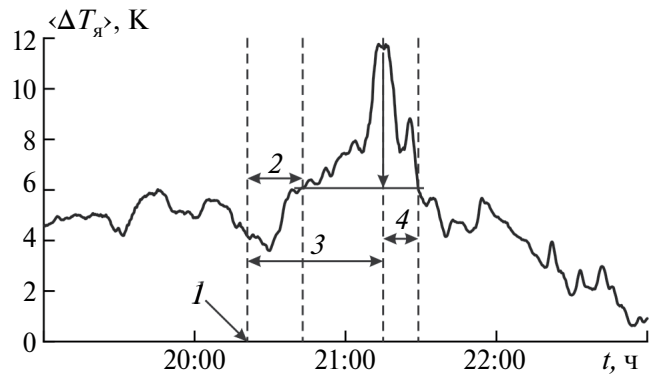


Рис. 5. Усредненное значение приращения радиояркой температуры от времени по четырем длинам волн, от 1.5 до 0.24 см; 1 — 20:11 время захода; временные промежутки: 2 — 22 мин от захода до начала эффекта; 3 — 54 мин от захода Солнца до максимального приращения $T_{я}$; 4 — 14 мин от максимума до восстановления значения $T_{я}$.



Рис. 6. Фотография серебристых облаков, 03.06.2021 г.

При этом были выполнены удачные микроволновые измерения серебристых облаков. Особенность этих облаков состояла в том, что с западной стороны облака имели ровную границу — фронт, и этот фронт, двигаясь на северо-запад, медленно прошел через диаграмму направленности антенн радиометров. Такое движение облаков позволило зафиксировать наибольшее приращение радиотеплового излучения на использованных длинах волн. В силу технических причин измерения проводили только в каналах 1.5 и 0.88 см и, дополнительно, на 2.3 см, для которых эффект проявлялся несколько слабее, чем для миллиметровых волн (см. рис. 4). Тем не менее приращения радиояркой температуры, вызванные отражением солнечного излучения от серебристых облаков, достигали ~25 К в канале 0.88 см (рис. 7). На рис. 7а приведены графики приращений $\Delta T_{я}$ для всех трех длин волн, а на рис. 7б — среднее значение приращения, нормированных на единицу приращений.

Серебристые облака на широте г. Читы в 2019–2022 гг. наблюдали в основном в июне, в редких случаях они появлялись во второй половине августа, например, 18 августа 2022 г. Серебристые

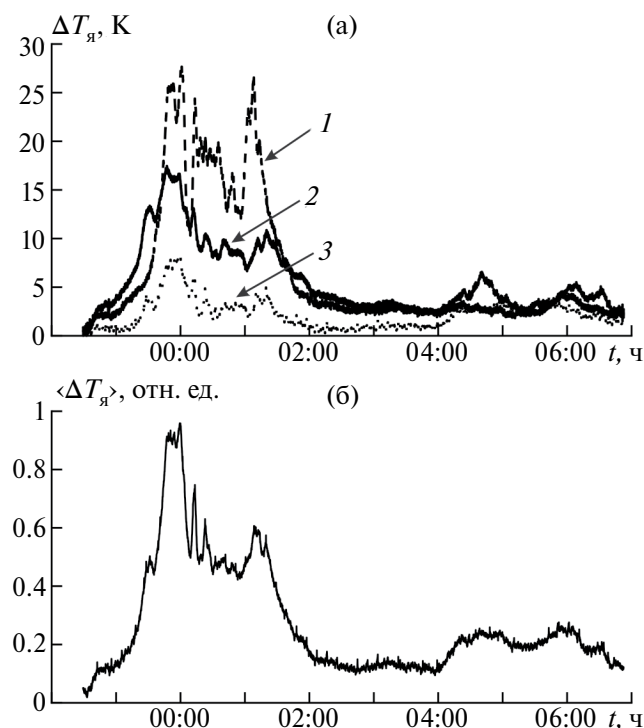


Рис. 7. Зависимости приращений $\Delta T_{\text{я}}$ на трех длинах волн, 0.88 (1), 1.5 (2) и 2.3 см (3), от времени в ночное время (3–4 июня 2021 г.), вызванных отражением излучения Солнца от серебристых облаков (а) и среднее значение нормированных к единице приращений $\Delta T_{\text{я}}$ (б).

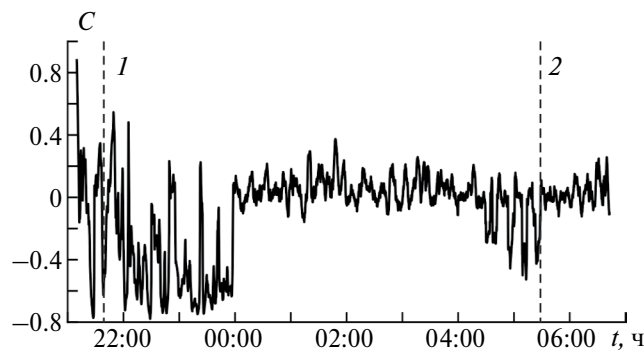


Рис. 8. Коэффициент корреляции для сигналов на длине волн 0.88 и 1.5 см (18–19 июля 2022 г.), расчеты каждого значения по 1000 точкам (за время ~ 5 мин): заход (1) и восход Солнца (2).

облака наблюдали в видимом диапазоне. При этом в микроволновом диапазоне явное приращение $\Delta T_{\text{я}}$ не регистрировали. Поэтому для определения возникновения отражения был вычислен коэффициент корреляции сигналов в двух каналах (рис. 8).

Из данных рис. 8 следует, что корреляция отраженных сигналов возникала приблизительно в течение двух часов после захода Солнца и в течение одного часа перед восходом, т.е. в те интервалы времени, когда должны наблюдаться серебристые облака. Он достигал значения -0.7 после

захода и -0.4 перед восходом Солнца. Отрицательное значение коэффициента корреляции обусловлено, возможно, анизотропией частиц и различием индикатрис рассеяния, что требует дальнейшего исследования.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффект возрастания рассеяния электромагнитного излучения в мезосферных облаках в широком интервале длин волн можно объяснить в рамках предложенной гипотезы о возникновении поверхностных плазмонов в проводящих ледяных наночастицах [19, 25]. Их колебания и резонансы приводят к сильному рассеянию падающих излучений в широком интервале длин волн, в том числе к заметному эффекту при радарных измерениях в мегагерцовом диапазоне.

Однако требуется объяснить появление высоких значений плотности свободных зарядов для достижения плазменной частоты выше частоты, на которой выполнены эксперименты. Как вначале предположили авторы, используя идею работ [20, 21] и оценку плазменной частоты для материалов наночастиц, появление повышенной концентрации зарядов на границе двух диэлектриков, один из которых сегнетоэлектрик, может объяснить наблюдаемый эффект только для микроволнового излучения (необходимо, чтобы плазменная частота свободных носителей заряда превышала частоты наблюдений). Поэтому возникают вопросы о механизмах появления высоких концентраций свободных носителей заряда.

Одним из объяснений обнаруженного эффекта для оптического диапазона может быть поведение островковых пленок металлов, в которых наблюдали фотопроводимость [26]. В этих структурах, кроме того, была обнаружена гигантская диэлектрическая проницаемость, достигающая $10^7 \dots 10^8$, и ряд других эффектов [27, 28]. Как следует из [20, 21], проводимость слоя на границе диэлектрик–сегнетоэлектрик определяется разностью статических диэлектрических проницаемостей. Если эта величина возрастает на 4–5 порядков, то существенно возрастает и значение плазменной частоты. Фотопроводимость ранее не наблюдали в металлах. Оказалось, что диэлектрическая проницаемость островковых пленок имела положительное значение, характерное для диэлектриков. Однако происходило изменение ее знака с положительного на отрицательный при наложении электрического поля. Такие же пленки по измерениям поверхностной проводимости образовывались в наших экспериментах.

Таким образом, островковые пленки изменяют свои свойства от металлических до диэлектрических при внешних воздействиях. При этом было установлено, что значительную роль в поведении

островковых пленок играет геометрический фактор. Можно предположить, что и в случае пленок льда 0 появление высоких концентраций свободных электронов может происходить за счет внутреннего фотоэффекта в сегнетоэлектрическом льде 0 при воздействии на пленки солнечного излучения. Другой механизм рассеяния и поглощения в тонких слоях связан с суперпозицией плазмон-поляритона, локализованного на границе металла и диэлектрика [29], который расширяет класс возможных решений.

Имеются вопросы и по поводу взаимодействия льда 0 с частицами из других материалов (соединений углерода, ионогидратов, жидких веществ и т.д.). Также этот вид льда может появляться в тропосфере и стратосфере при соответствующих условиях как при гомогенном, так и при гетерогенном образовании его зародышей кристаллов. Поскольку лед 0 является метастабильным, то через некоторое время ледяные кластеры будут содержать смесь льдов различных видов. Все это должно проявляться в электромагнитных свойствах облачных образований. Например, аномалии рассеяния светового излучения в холодных облаках ранее наблюдали в самолетных экспериментах, выполненных в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) [30]. Необычность аномалий была такова, что автор статьи объяснял их существованием особой модификации воды высокой плотности (А-вода). Однако эта идея другими исследователями не была поддержана, хотя не было и возражений по поводу выполненных в ЦАО экспериментов. За последние десятилетия были достигнуты значительные успехи в компьютерном моделировании структуры холодной воды. В многочисленных опубликованных работах по моделированию структуры переохлажденной воды А-вода не была обнаружена. Возможно, что использование нашей гипотезы может объяснить наблюдаемые в работе [30] аномалии оптических характеристик переохлажденных облаков.

Можно сделать предварительный вывод, что полученные в наших экспериментах данные подтвердили гипотезу о значительном усилении рассеяния электромагнитных излучений при конденсации на диэлектрические пылевые наночастицы недавно открытого сегнетоэлектрического льда 0. Если это явление будет детально исследовано с использованием усовершенствованных методик, то появится дополнительный метод изучения физических характеристик холодных облаков в атмосфере. Представляется интересным использование микроволновых радаров для определения слоев со льдом 0. Ранее считалось, что области атмосферы с низкой концентрацией ледяных частиц прозрачны для микроволнового излучения, однако в случае образования льда 0 на наночастицах из диэлектриков

ситуация с переносом излучения существенно меняется.

Как известно, имеется ряд вопросов, требующих дальнейшего исследования физики холодных облаков [31]. К ним также добавляется то, что в настоящее время не известно давление насыщенных паров льда 0. Однако оно должно быть ниже, чем для льда Ih, из-за большей энергии связи дипольных молекул воды с поверхностью сегнетоэлектрического льда. Поэтому возможно наблюдение рассеивающих свойств облаков в ИК- и микроволновом диапазонах, расположенных на высотах, выше обычного появления серебристых облаков, т.е. до 100...110 км. Кроме того, надо учитывать, что конденсация с образованием льда 0 происходит по гетерогенному механизму (на твердых или жидких частицах другого вещества), что также может понизить порог конденсации по давлению паров воды. Так, в [7] отмечено, что отражение излучения низкочастотных радаров наблюдали от слоев на высотах до 100 км. При этом отражение сигналов лидара от этих слоев в некоторых случаях отсутствовало. В рамках высказанной гипотезы о механизме свечения мезосферных облаков это возможно, если плазменная частота свободных зарядов ледяных частиц оказывается ниже частоты излучения лидара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена гипотеза о новом эффективном механизме рассеяния излучения Солнца серебристыми облаками. Рассеяние определяется свойствами ледяных частиц в видимом, ИК- и микроволновом диапазонах. Эффект связан с образованием на поверхности пылевых частиц земного и космического происхождения, а также нанокристаллов льда Ih и Ic сегнетоэлектрического льда 0 при температурах ниже -23°C . В таких частицах возникает слой с высокой электропроводностью толщиной порядка 1 нм на контакте льда 0 и диэлектрика. Электропроводность слоя определяется разницей значений статической диэлектрической проницаемости двух материалов, что приводит к росту концентрации носителей заряда в двойном электрическом слое. Металлические свойства частиц в наибольшей степени проявляются при температурах $-23...-140^{\circ}\text{C}$. Такие условия имеют место в мезосфере.

2. Рассеяние излучений наноразмерными проводящими структурами объясняется образованием плазмонов, их колебаниями и резонансными явлениями. Наиболее сильное рассеяние возникает на частоте Фрелиха при отрицательном значении диэлектрической проницаемости -2 . Эта частота находится ниже плазменной частоты и определяется плотностью носителей заряда и их эффективной массой. Кроме роста электропроводности в контактном слое между диэлектриком

и сегнетоэлектриком, возможны и другие механизмы появления плазмонов. Такой эффект может быть связан с внутренним фотоэффектом в анизотропных проводящих частицах с сегнетоэлектрическим льдом. Не исключены и другие механизмы возникновения плазмонных колебаний, которые определяются формой, структурой дисперсных частиц и их химическими особенностями.

3. Теоретическое рассмотрение, лабораторные исследования и натурный эксперимент позволяют сделать предварительный вывод о возможности регистрации серебристых облаков с использованием микроволновой радиометрии при подсветке солнечным излучением. Если, однако, эффективный коэффициент отражения окажется недостаточным для регулярных радиометрических измерений, представляет интерес изучить использование радарных методов определения характеристик отражающих слоев на частотах 10...100 ГГц. Насколько нам известно, такие частоты еще не использовались для исследований серебристых облаков. Интересно рассмотреть и возможности микроволновых радиометрических, радарных и лидарных измерений мезосферных облаков из космоса.

4. Таким образом, эффективность рассеяния электромагнитного излучения в широком диапазоне частот диэлектрическими частицами нанометровых размеров, покрытых льдом θ , определяется проводимостью контактного слоя, геометрическими факторами, условиями формирования пленок льда. Проводимость, в свою очередь, определяется характеристиками пленок, их температурой, островковой структурой и ее особенностями (например, возникновением и исчезновением перколяции [32]). В результате спектральные характеристики рассеяния и поглощения таких облачных сред будут иметь разнообразные особенности, определяемые не только концентрацией, но и сложной зависимостью диэлектрических характеристик, в том числе плазменной частоты и частоты Фрелиха. Для анизотропных частиц частотная область рассеяния и поглощения может достигать нулевых частот. Многообразие факторов, влияющих на образование льда θ , требует совершенствования методик измерения характеристик сред, его содержащих. Однако особенности электромагнитных свойств льда θ в природной среде открывают возможности для исследования атмосферных процессов и облачных образований на других высотах в тропосфере и стратосфере, где температура опускается ниже -23°C .

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Russell J.* // *Global Change and the Solar-Terrestrial Environment*. 12–17 Jun. 2010, Aspen. P. 1.

2. *Romejko V.A., Dalin P.A., Pertsev N.N.* // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003. V. 108. № D8. P. 8443. <https://doi.org/10.1029/2002JD002364>
3. *Dalin P., Pertsev N., Perminov V. et al.* // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38. № 1. P. 61. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-61-2020>
4. *Бронштэн В.А., Гришин Н.И.* *Серебристые облака*. М.: Наука, 1970.
5. *Thomas G.E.* // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. № 9. P. 1737. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)90470-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)90470-4)
6. *DeLand M.T., Shettle E.P., Thomas G.E., Olivero J.J.* // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. № 1. P. 9. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.003>
7. *Ролдугин В.К., Черняков С.М., Ролдугин А.В., Оглоблина О.Ф.* // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58. № 3. С. 343. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030045>
8. *Rapp M., Lübken F.J.* // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2009. V. 114. № D11. P. D11204. <https://doi.org/10.1029/2008JD011323>
9. *Murray B.J., Plane J.M.C.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2005. V. 7. № 23. P. 3970. <https://doi.org/10.1039/B508846A>
10. *Thomas G.E., Olivero J.J., Jensen E.J. et al.* // *Nature*. 1989. V. 338. № 6215. P. 490. <https://doi.org/10.1038/338490a0>
11. *von Savigny C., Sinnhuber M., Bovensmann H. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № 2. P. L02805. <https://doi.org/10.1029/2006GL028106>
12. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. № 8. С. 34. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.08.44532.16338>
13. *Tromp T.K., Shia R.L., Allen M. et al.* // *Sci.* 2003. V. 300. № 5626. P. 1740. <https://doi.org/10.1126/science.1085169>
14. *Сывороткин В.Л.* *Экологические аспекты дегазации Земли*. М.: Геоинформмарк, 1998.
15. *Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O.* // *Proc. SPIE. 25th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 01–05 July 2019, Novosibirsk, Russia. Washington: SPIE, 2019. V. 11208. P. 1120818. <https://doi.org/10.1117/12.2539769>
16. *Russo J., Romano F., Tanaka H.* // *Nature Mater.* 2014. V. 13. № 7. P. 733. <https://doi.org/10.1038/NMAT3977>
17. *Quigley D., Alfè D., Slater B.* // *J. Chem. Phys.* 2014. V. 141. № 16. P. 161102. <https://doi.org/10.1063/1.4900772>
18. *Бордонский Г.С., Орлов А.О.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2017. Т. 105. № 7–8. С. 483. <https://doi.org/10.7868/S0370274X17080045>
19. *Борен К., Хафмен Д.* *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. М.: Мир, 1986.

20. Korobeynikov S.M., Drozhzhin A.P., Furin V.P. et al. // Proc. of 2002 IEEE14th ICDL. 12 July 2002, Graz, Austria. N.Y.: IEEE, 2002. P. 270.
<https://doi.org/10.1109/ICDL.2002.1022681>
21. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Soloveitchik Yu.G. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. № 6. P. 915.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/6/021>
22. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111. № 5. С. 311.
<https://doi.org/10.31857/S0370274X20050070>
23. Leoni F., Russo J. // Phys. Rev. X. 2021. V. 11. № 3. P. 031006.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.031006>
24. Solveyra E.G., Llave E., Scherlis D.A., Molinero V. // J. Phys. Chem. B. 2011. V. 115. Iss. 48. P. 14196.
<https://doi.org/10.1021/jp205008w>
25. Климов В. В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.
26. Болтаев А.П., Пенин Н.А., Погосов А.О., Пудонин Ф.А. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. № 5. С. 1067.
27. Болтаев А.П., Пудонин Ф.А. // Краткие сообщ. по физике ФИАН. 2011. № 7. С. 3.
28. Муравьев В.М., Кукушкин И.В. // Успехи физ. наук. 2020. Т. 190. № 10. С. 1041.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2019.07.038637>
29. Альшиц В.И., Любимов В.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. № 2. С. 127.
<https://doi.org/10.31857/S1234567820140128>
30. Невзоров А.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 830.
31. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016.
32. Томилина О.А., Бержанский В.Н., Томилин С.В. // ФТТ. 2020. Т. 62. № 4. С. 614.
<https://doi.org/10.21883/FTT.2020.04.49129.610>

THE PROPOSED MECHANISM OF GLOW OF MESOSPHERE CLOUDS

G. S. Bordonskiy*, A. A. Gurulev, A. O. Orlov, V. A. Kazantsev

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the RAS,
Chita, 672002 Russian Federation*

**E-mail: lgc255@mail.ru*

Received March 27, 2023; revised November 2, 2023; accepted November 25, 2023

The question of the physical mechanism of electromagnetic radiation scattering by mesospheric (noctilucent) clouds is considered. A hypothesis has been expressed about the special electromagnetic characteristics of nanometer-sized ice particles that make up mesospheric clouds. Particle ice consists of a recently discovered crystalline modification of water — ice 0, formed by the condensation of vapor on dust particles at temperatures of $-140\dots-23^{\circ}\text{C}$. Ice 0 is a ferroelectric, and upon contact with a dielectric, a layer with high electrical conductivity is formed. Due to plasmon resonance in nanosized layers, strong scattering of electromagnetic radiation occurs over a wide frequency range. This mechanism causes the glow of noctilucent clouds when illuminated by the radiation of the Sun.

Keywords: noctilucent clouds, ice 0, plasmons, scattering of electromagnetic radiation