

23 Существование эффекта „просветления“ льда в инфракрасном диапазоне

© В.А. Казанцев, Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Чита, Россия

e-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 09.09.2025 г.

В окончательной редакции 19.03.2025 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Показан эффект „просветления“ пресного льда как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне вблизи температуры 0°C на длинах волн $3.8\text{--}4.2$, $10\text{--}16\ \mu\text{m}$. Максимально обнаруженное уменьшение коэффициента поглощения среды составило $\sim 30\%$. Предполагается влияние пространственного расположения базисных плоскостей кристаллов на эффект, который максимален при параллельном расположении вектора электрического поля волн и базисной плоскости.

Ключевые слова: пресный лед, коэффициент поглощения, инфракрасный диапазон, фазовый переход, плазмонные эффекты.

DOI: 10.61011/OS.2026.04.63026.8551-25

Введение

В ряде работ [1–4] сообщалось об эффекте „просветления“ льда, который проявляется в уменьшении значений действительной и мнимой частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости льда вблизи температуры фазового перехода лед–вода в оптическом и микроволновом диапазонах. Подобное уменьшение диэлектрических характеристик природных сред может приводить к неправильной интерпретации данных дистанционного зондирования криосферных образований. Показательной может служить работа [5], где на основании измерений электромагнитных потерь наблюдался эффект „просветления“ льда в интервале температур $-1 \dots -0.2^\circ\text{C}$. В результате при расчетах для плоскостной структуры воздух-лед-вода на частоте $3.4\ \text{GHz}$ и толщине льда $1.5\ \text{m}$ показано, что уменьшение радиояркостной температуры, характеризующей мощность теплового излучения, достигает $\sim 30\ \text{K}$. Это соответствует льду существенно меньшей толщины.

Согласно [1–4], отношение крайних частот, где обнаруживается данный эффект, имеет значение 10^6 , а именно от микроволнового до ультрафиолетового диапазонов. Неожиданно широкий частотный диапазон, где наблюдается просветление, указывает на особое электрофизическое поведение льда. Стоит отметить, что в цитируемых работах отсутствуют данные об эффекте в инфракрасной (ИК) области спектра. В настоящее время данный диапазон активно используется в спутниковых системах для решения большого круга научно-практических задач. Например, нормализованный разностный снежный индекс (NDSI) определяется отношением разности значений яркости в видимой ($560\ \text{nm}$) и ближней ИК ($1650\ \text{nm}$)-областях спектра к их сум-

ме [6,7]. С помощью вышеуказанного индекса производится определение наледных образований в период, когда снежный покров уже отсутствует [8,9]. Поэтому для анализа данных о состоянии мерзлых образований необходимы знания об излучательных и поглощающих характеристиках льда вблизи температуры фазового перехода лед-вода в ИК-диапазоне, ввиду обнаруженного эффекта „просветления“ в других диапазонах. Цель настоящей работы заключается в экспериментальном определении эффекта „просветления“ льда в ИК-диапазоне на длинах волн $3.8\text{--}4.2$, $10\text{--}16\ \mu\text{m}$, где этот эффект, по всей видимости, будет проявляться слабее по причине большого значения мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости [10].

Методика эксперимента

Для исследования эффекта „просветления“ в инфракрасном диапазоне использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. В роли генератора излучения выступала галогеновая лампа (модель HRS51), которая на схеме обозначена (1). Лампу нагревали током, значительно меньшим номинального, для создания слабого потока излучения и исключения быстрого нагревания образца льда (3). Генерация потока излучения была стабильной, вариации по мощности в течение длительного времени не превышали 0.1% . Для увеличения чувствительности радиометрического приемника сигнал модулировался с использованием вращающегося лепесткового диска (2). Далее, модулированное излучение проходило через образец льда (3) и регистрировалось радиометрическим приемником (4) с полосой от 2 до $25\ \mu\text{m}$ и фотодетектором (5) с полосой от $380\ \text{nm}$ до $1\ \mu\text{m}$. В некоторых экспериментах

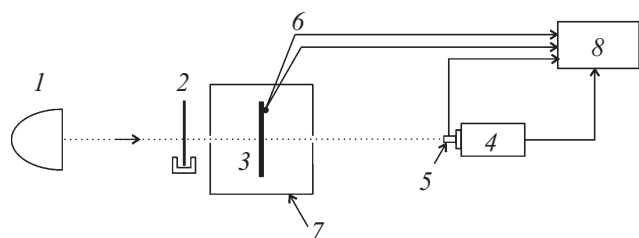


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования эффекта „просветления“ в ИК-диапазоне: 1 — галогеновая лампа, 2 — модулятор, 3 — образец льда, 4 — ИК-радиометр на 2...25 μm , 5 — фотодиод видимого диапазона, 6 — термопара, 7 — термостат, 8 — система сбора данных.

вместо фотодетектора видимого диапазона использовался фотодиод Lms43PD-03CG фирмы „ЛЕД Микросенсор НТ“ с полосой 3.8–4.2 μm на уровне 80% от максимальной чувствительности. Имелась возможность размещения узкополосных фильтров ИК-диапазона для сужения полосы в радиометрическом приемнике. Для измерения температуры использовалась термопара (6) с точностью 0.2 $^{\circ}\text{C}$. Для уменьшения скорости нагревания образца льда использовался термостат (7), на дно которого помещался предварительно охлажденный металлический радиатор. Для записи выходных сигналов от измерительных приборов использовалась система сбора данных (8) фирмы Agilent.

В ходе проведения экспериментов использовались пластины льда размерами 5 \times 5 cm^2 и толщинами от 0.1 до 3 mm . Они изготавливались следующим образом: в кювету наливалась вода с различной степенью минерализации. Кювета помещалась в морозильную камеру с постоянной температурой $\sim -15^{\circ}\text{C}$. При образовании льда на поверхности воды получалась пластина льда необходимой толщины. Минерализация исходной воды с NaCl варьировалась в пределах от 1 до 400 mg/l . Содержание соли, захваченной льдом, находилось в интервале 1...26 mg/kg , что соответствует льдам пресных природных водоемов. Малое количество солей во льду объясняется низким коэффициентом захвата солей, который зависит от температуры, типа соли и других внешних факторов [11].

Изготовленные образцы находились в морозильной камере при температуре $\sim -15^{\circ}\text{C}$. Далее образец помещался в экспериментальную установку, где к нему прижималась термопара. Температура воздуха в помещении составляла около 21 $^{\circ}\text{C}$, поэтому нагревание образца льда происходило за 0.5–3 min . Эксперимент завершался после явных признаков таяния образца по визуальному обнаружению воды на поверхности образца льда. Один и тот же образец мог использоваться повторно (после завершения эксперимента образец снова помещался в морозильную камеру).

Также при помощи поляризационного микроскопа определялось наличие отдельных кристаллов льда в

образце. По интенсивности пропускаемого поляризованного излучения определялось направление главной оптической оси кристаллов льда. Подробная методика исследования представлена в [12].

Полученные результаты и их обсуждение

По измеренным значениям интенсивности проходящего излучения через образцы льда находилась коэффициент поглощения α , который равен $\alpha = 1/h \ln(I_0/I)$, где h — толщина образца, I_0 — интенсивность излучения без образца, I — интенсивность излучения с образцом. На рис. 2 представлены результаты одного из экспериментов.

Особенности данного эксперимента заключаются в том, что на графике (рис. 2, *a*) выделяется область, где коэффициент поглощения уменьшается на $\sim 10\%$. На рис. 2, *b* представлена фотография, сделанная в поляризационном микроскопе при скрещенных поляризаторах. На снимке фиксируются отдельные кристаллы льда, оптическая ось которых направлена под некоторым углом к плоскости съемки. В случае если отдельные кристаллы имеют интерференционную окраску, как на рис. 2, *b*, то их главная оптическая ось направлена под некоторым углом к плоскости съемки. В случае, когда отдельные кристаллы имеют затемнение, как на рис. 2, *b* и 3, *b*, их главная оптическая ось параллельна оптической оси микроскопа [12]. По поляризационным картинам на рис. 2, *b* и 3, *b* можно сделать вывод о том, что базисные плоскости кристаллов преимущественно совпадают с направлением вектора электрического поля проходящего излучения.

После экспериментов для области просвечивания производилась фотофиксация кристаллов льда на предмет их пространственной и временной изменчивости вследствие деструкции внешних слоев исследуемых образцов и повторного замораживания. Было выявлено, что отдельные кристаллы в образцах сохраняют свое положение и размеры, что подтверждается многочисленными поляризационными снимками льда в течение продолжительного периода времени.

В экспериментах, результаты которых представлены на рис. 3, *a* и 4, *a*, при нагревании образцов происходит уменьшение коэффициента поглощения как в ИК-области спектра, так и в видимом диапазоне. В данных экспериментах коэффициент поглощения отличается от значений, полученных ранее, например [13–15]. Это связано с тем, что радиометрический приемник, который использовался в эксперименте, имеет достаточно широкую полосу, в которой поглощающие характеристики льда отличаются на порядок величины, в зависимости от длины волны. Например, при $\lambda = 11 \mu\text{m}$ $\alpha = 1090 \text{ cm}^{-1}$, а при $\lambda = 13 \mu\text{m}$ $\alpha = 104 \text{ cm}^{-1}$ [13]. Поэтому на графике приведен усредненный коэффициент поглощения.

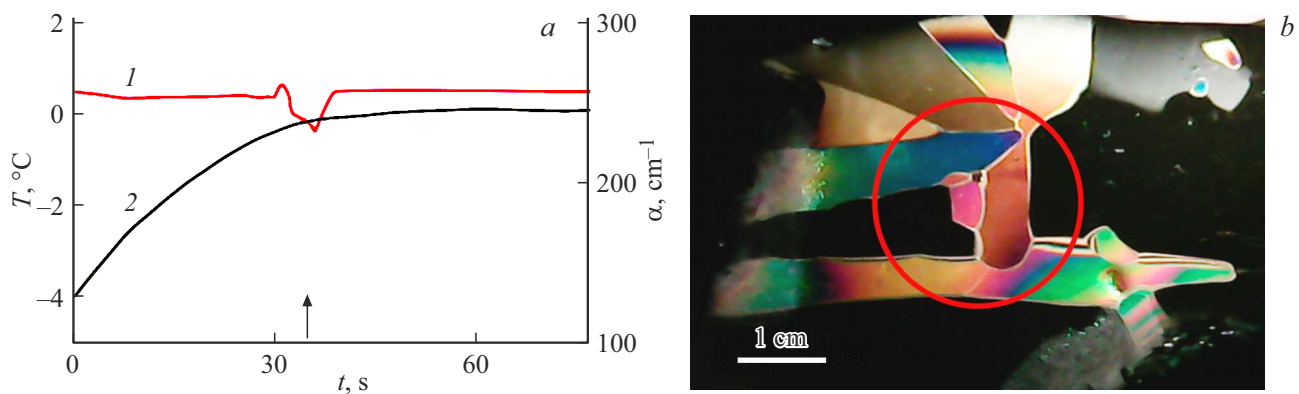


Рис. 2. (а) Результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне $3.8\text{--}4.2\ \mu\text{m}$ (1) и температуры (2) в образце льда толщиной $0.1\ \text{mm}$ в зависимости от времени нагревания, стрелочкой отмечен эффект „просветления“. (б) Фотография образца льда через поляризационный микроскоп при скрещенных поляризаторе и анализаторе, окружностью отмечена область просветливания.

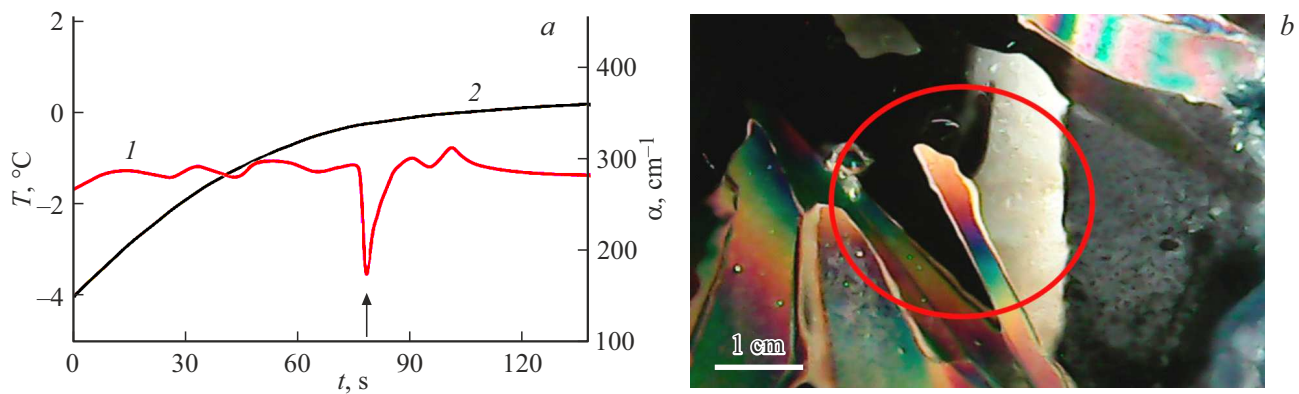


Рис. 3. (а) Результаты измерения коэффициента поглощения в диапазоне $10\text{--}16\ \mu\text{m}$ (1) и температура (2) в образце льда толщиной $0.1\ \text{mm}$ в зависимости от времени нагревания, стрелочкой отмечен эффект „просветления“. (б) Фотография образца льда через поляризационный микроскоп при скрещенных поляризаторе и анализаторе, окружностью отмечена область просветливания.

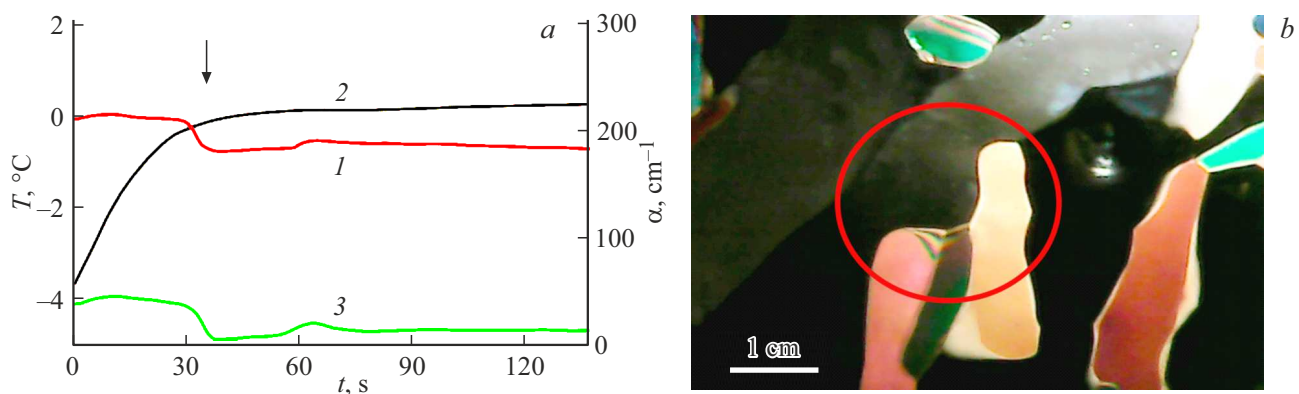


Рис. 4. (а) Результаты измерения коэффициента поглощения на длине волны $10\text{--}16\ \mu\text{m}$ (1) и в видимом (3) диапазоне в образце льда в зависимости от времени; (2) — температура образца льда толщиной $0.1\ \text{mm}$. (б) Фотография образца льда через поляризационный микроскоп при скрещенных поляризаторе и анализаторе, окружностью отмечена область просветливания.

Проведенные эксперименты показывают, что при расположении базисных плоскостей кристаллов льда параллельно вектору напряженности электрического поля (рис. 3, б, 4, б) можно ожидать увеличения прохо-

дящей мощности излучения. На данную особенность было обращено внимание и ранее, например, в [1–4]. В работе [16], экспериментально показано, что при расположении базисных плоскостей кристаллов льда

параллельно вектору напряженности электрического поля на частоте 3.4 GHz степень уменьшения мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости достигала 5 раз, а при перпендикулярном расположении — 2.5 раза. Стоит отметить, что в работах [1–4] не проводилось специальных петрографических исследований.

Возникает вопрос, не является ли просветление результатом интерференции в плоскостойких структурах. Для выяснения этого выполнены расчеты для плоской пластины льда толщиной 0.1 mm, на которую нормально падает волна с $\lambda = 15 \mu\text{m}$. Для этой длины волны $\epsilon' = 1.24$, а $\epsilon'' = 0.0762$ [10]. Рассеяние в среде не учитывалось. Согласно выполненным расчетам, отношение интерферирующих излучений составляет 10^{-9} . Следовательно, эффект „просветления“ не связан с интерференционными явлениями. Стоит отметить, что не производится учет появления воды на поверхности ледяной пластины. Это связано с тем, что эффект „просветления“ наблюдается во льду еще до появления воды, это подтверждается резонаторными измерениями в микроволновом диапазоне [1,2,4]. Поэтому можно сделать вывод о том, что влиянием интерференции в данных экспериментах можно пренебречь.

Указанные результаты не противоречат высказанной в работе [4] гипотезе об образовании плазмонных эффектов, связанных с базисными плоскостями кристаллов льда. При приближении температуры образца к 0°C происходит пластическое течение с образованием квазижидких пленок по слоям, параллельным базисным плоскостям кристаллов. Плазмонные резонансы возникают в островковых образованиях в пленках из-за появления металлической проводимости [17], вызванной сегнетоэлектрическим упорядочением на контакте льда и квазижидких слоев, по которым происходит течение [4].

Выводы

Предложена методика одновременного измерения мощности проходящего излучения через образец льда в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения вблизи температуры его таяния.

Обнаружен эффект „просветления“ ледяной структуры в ИК-диапазоне на длинах волн 3.8–4.2, 10–16 μm при температуре около 0°C .

Возможно, что на эффект „просветления“ влияет положение базисных плоскостей кристаллов льда. Максимальное приращение мощности наблюдается при параллельном расположении вектора электрического поля относительно базисных плоскостей кристаллов льда. Максимальное уменьшение коэффициента затухания во льду составило $\sim 30\%$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов. ПЖТФ, **35** (22), 46 (2009). [G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, S.D. Krylov. Tech. Phys. Lett., **35** (11), 1047 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009110224].
- [2] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов. Радиотехника и электроника, **59** (6), 587 (2014). DOI: 10.7868/S0033849414060060
- [3] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, В.А. Казанцев, Д.В. Середин. Опт. и спектр., **131** (10), 1374 (2023). DOI: 10.61011/OS.2023.10.56889.5302-23 [G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, V.A. Kazantsev, D.V. Seredin. Opt. Spectrosc., **132** (4), 333 (2024). DOI: 10.1134/S0030400X24040039].
- [4] Г.С. Бордонский. ПЖТФ, **50** (9), 35 (2024). [G.S. Bordonskiy. Tech. Phys. Lett., **50** (5), 30 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.05.58417.19587].
- [5] В.А. Казанцев, Г.С. Бордонский. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, **22** (1), 259 (2025). DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-259-267
- [6] Н.В. Крутский, И.Ю. Кравченко. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, **15** (2), 159 (2018). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168
- [7] О.В. Николаева. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, **19** (5), 53 (2022). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-53-62
- [8] О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Землянскова, В.Р. Алексеев, Н.В. Нестерова, А.А. Остахов. Криосфера Земли, **27** (6), 27 (2023). DOI: 10.15372/KZ20230603 [O.M. Makarieva, A.N. Shikhov, A.A. Zemlianskova, V.R. Alexeev, N.V. Nesterova, A.A. Ostashov. Earth's Cryosphere, **27** (6), 27 (2023)].
- [9] В.Н. Черных, А.А. Аюржанаев, М.А. Жарникова, Б.В. Содномов, А.Н. Шихов, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев, С.В. Пьянков. Географический вестник, **3** (62), 169 (2022). DOI: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179
- [10] S.G. Warren. Philos. Trans. A: Math. Phys. Eng. Sci., **377** (2146), 20180161 (2019). DOI: 10.1098/rsta.2018.0161.
- [11] Г.С. Бордонский, С.Д. Крылов. Изв. РАН. Серия географическая, **4**, 98 (2000).
- [12] П.А. Шумский. Основы структурного ледоведения: Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования (АН СССР, М., 1955).
- [13] W.M. Irvine, J.B. Pollack. Icarus, **8** (1–3), 324 (1968). DOI: 10.1016/0019-1035(68)90083-3
- [14] В.И. Гайдук, Б.Г. Кутуза. Опт. и спектр., **101** (5), 744 (2006).
- [15] R.M. Mastrapa, S.A. Sandford, T.L. Roush, D.P. Cruikshank, C.M. Dalle Ore. The Astrophysical J., **701** (2), 1347 (2009). DOI: 10.1088/0004-637X/701/2/1347
- [16] Г.С. Бордонский, В.А. Казанцев. ЖТФ, **95** (7), 1427 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60666.13-25
- [17] В.В. Климов. Наноплазмоника (ФИЗМАТЛИТ, М., 2009).