

## 08 Экспериментальное обнаружение просветления пресного льда в оптическом диапазоне вблизи 0°C

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

Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН,  
672014 Чита, Россия

e-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

В окончательной редакции 23.10.2023 г.

Принята к публикации 23.10.2023 г.

Представлены результаты лабораторных измерений прозрачности блоков пресного льда в оптическом диапазоне в интервале температур от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ . Исследования были выполнены на двух длинах волн в видимом диапазоне (на длине волны 535 nm) и ультрафиолетовом диапазоне (на длине волны 370 nm). Исследовали лед природного пресного водоема с характерной преимущественной пространственной ориентацией главной оптической оси кристаллов. Установлено, что при приближении к температуре  $0^{\circ}\text{C}$  возникает просветление образца (уменьшение затухания). Эффект возникает в интервале  $-0.5-0^{\circ}\text{C}$ . Он определяется возникновением пластической деформации из-за термических напряжений, вызванной начальной стадией фазового перехода лед-вода. Просветление в экспериментах с блоками льда толщиной  $\sim 10$  см составляло значение 3–25%. Полученные результаты представляют интерес для решения задач дистанционного зондирования, так как тающий лед является широко распространенным объектом из-за его значительной теплоты фазового перехода. Ранее эффект просветления пресного льда был также обнаружен в микроволновом диапазоне при приближении температуры образца к точке фазового перехода.

**Ключевые слова:** пресный лед, температура таяния, оптический диапазон, просветление льда, пластическая деформация.

DOI: 10.61011/OS.2023.10.56889.5302-23

### Введение

Электромагнитные свойства льда вблизи  $0^{\circ}\text{C}$  представляют интерес для практических целей из-за большого значения теплоты фазового превращения. С другой стороны, процессы, происходящие вблизи фазовых переходов воды, еще плохо изучены. Считается, что вблизи  $0^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от концентрации разнообразных включений, во льду возникает плавление некоторых областей ледяных структур, что приводит к возрастанию их эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ). Это определяется более высокими значениями  $\epsilon$  воды по сравнению с чистым льдом, особенно на низких частотах. Чем ближе температура среды ( $T$ ) к  $0^{\circ}\text{C}$ , тем более высока концентрация жидких включений. Вследствие их структурирования возникает анизотропия диэлектрической проницаемости, что может приводить к поляризационным особенностям различных ледяных объектов. Например, в работе [1] наблюдали поляризационную разность радарных сигналов при зондировании речного льда. Возможно, в данном случае  $\epsilon$  ледяного покрова при контакте с водой (в нижнем слое, где его температура равна  $0^{\circ}\text{C}$ ) имела тензорный характер, определяемый влиянием течения воды на структуру льда вблизи температуры фазового перехода.

В работах [2,3] было обращено внимание на особые характеристики пресного льда при прохождении микроволнового излучения через среду при ее нагревании

до  $0^{\circ}\text{C}$ . Был обнаружен эффект „просветления“, т. е. заметного возрастания мощности проходящего через образец льда излучения перед появлением первых признаков таяния.

Объяснение эффекта, предложенное в [2,3], заключается в том, что вблизи фазового перехода лед-вода при небольших механических напряжениях возникает сдвиговая пластическая деформация кристаллов льда. С другой стороны, с точки зрения физики явления, можно отметить, что лед при таянии находится как в состоянии кристалла, так и жидкости, поскольку в нем появляются области с разорванными водородными связями. Данное переходное состояние должно приводить к аномалиям физических характеристик, которые будут также зависеть от структурных особенностей среды (примесей, ориентации дефектов и т. д.).

Указанные выше работы по просветлению льда были выполнены только в микроволновом диапазоне. Вместе с тем оптический диапазон является одним из наиболее используемых в дистанционном зондировании Земли. Его применяют для проведения исследований атмосферы и различных типов подстилающей поверхности. Так, в работе [4] при использовании спутниковых данных видимого диапазона проведено исследование зон речного стока в Мировой океан. В работе [5] проанализированы вегетационные характеристики растительных покровов. В [6] исследуются параметры атмосферы. Широко ис-

пользуется оптический диапазон для изучения криосферных образований [7].

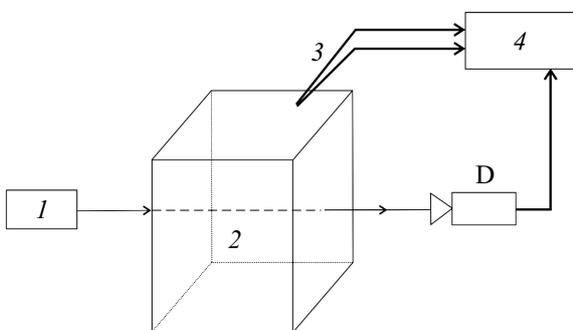
Что касается спектральных особенностей льда при температуре вблизи 0°С, они используются при дешифровке данных дистанционного зондирования холодных облачных образований, наледей, снежных и ледяных покровов, мерзлых почв и грунтов. Например, в работе [8] определяли нормализованный разностный индекс снега (NDSI), основа которого заключается в использовании зеленого и ближнего инфракрасного диапазонов [9]. При этом актуальны исследования льда с уточнением его характеристик в области температуры фазового перехода.

Поэтому цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы изучить затухание оптического излучения в пресном льде при температуре вблизи 0°С и показать необходимость углубленных исследований поглощения и рассеяния электромагнитных волн в этом случае.

## Методика эксперимента

В настоящей работе были выполнены исследования пропускания оптического излучения через блок пресного льда. Измерения были выполнены в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. В видимом диапазоне использовали полупроводниковый лазер на длину волны ( $\lambda$ ) 535 nm с линейной поляризацией. В ультрафиолетовом диапазоне использовали неполяризованный свет от светодиодного излучателя на длину волны 370 nm. На рис. 1 представлена схема установки для измерения мощности проходящего излучения ( $P$ ) от времени ( $t$ ). Точность абсолютных измерений температуры  $\sim 0.2^\circ\text{C}$ . Измерительную термопару помещали в блок на глубину 1 см.

В используемой методике излучение пропускали через образец в виде параллелепипеда и предполагали, что коэффициент отражения ( $R$ ) слабо изменяется в процессе эксперимента. Это следует из того, что на используемых длинах волн действительная часть коэффициента преломления льда ( $n$ ) при 0°С составляет 1.311



**Рис. 1.** Схема установки для измерения мощности проходящего излучения в оптическом диапазоне через лед вблизи температуры фазового перехода. 1 — излучатель, 2 — образец — блок льда, 3 — термопара, 4 — система сбора и записи данных, D — фотодетектор.

( $\lambda = 535$  nm), 1.334 ( $\lambda = 370$  nm) [10,11]. Откуда следует значение коэффициента отражения  $R \sim 0.018-0.02$ , определенное по формуле  $R = [(n-1)/(n+1)]^2$ . Если  $n$  по какой-либо причине изменится на 0.001, то приращение  $\Delta R$  составит 0.0001 или  $\sim 0.5\%$ . Такое изменение возможно, если на границе возникают слои жидкой воды. При толщине слоя порядка длины волны необходимо учитывать изменение коэффициента пропускания такой трехслойной среды. Для воды  $n = 1.333$  ( $\lambda = 535$  nm), 1.334 ( $\lambda = 370$  nm). Эти значения выше, чем для льда, поэтому при появлении пленок воды в начальной стадии таяния и возникновении интерференции коэффициент прохождения должен уменьшаться (т.е. возрастать затухание излучения) [12]. Данная особенность может использоваться для определения начала появления жидкости на поверхности льда при анализе влияния граничного слоя на перенос излучения. Мнимой частью коэффициента преломления воды и льда можно пренебречь, так как она составляет значение на много порядков величины ниже, чем действительная часть.

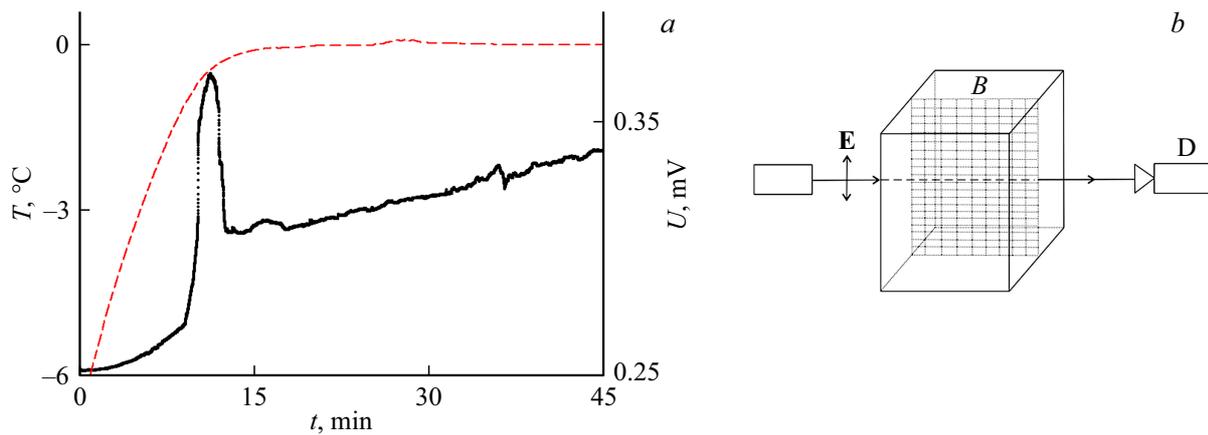
Образцы льда для выполнения исследования извлекались из ледяного покрова пресного озера Арахлей (Забайкальский край) в феврале–марте. В это время концентрация солей во льду в средней части ледяного покрова по его высоте составляет значение порядка 1 mg/l [3].

Образец во время эксперимента располагали так, чтобы вектор электрического поля электромагнитных волн был направлен либо параллельно, либо перпендикулярно базисной плоскости кристаллов льда. Как было установлено в ряде работ, при формировании озерного льда 90–100% кристаллов в ледяном покрове после начальной стадии формирования покрова, когда исчезают подледные течения, ориентируются главной оптической осью „С“ перпендикулярно к поверхности раздела лед-воздух и могут отклоняться от нормали в пределах нескольких градусов. В соответствии с классификацией, данной Н.В. Черепановым, это соответствует льду типа А1, который образуется в небольших озерах при градиентах температур 1–4°С/м в приледном слое воды [13].

Ранее в [2] был отмечен эффект просветления образцов из льда в микроволновом диапазоне в зависимости от расположения базисных плоскостей кристаллов по отношению к вектору электрического поля волн. В настоящем исследовании было обращено внимание на эту особенность.

Образцы льда хранились в морозильной камере при температуре  $-15^\circ\text{C}$ . Далее их помещали в установку, и они нагревались при комнатной температуре до достижения 0°С. После увлажнения поверхности льда, т.е. появления признаков таяния, эксперимент завершался. Приемник и источник излучения находились при постоянной температуре.

Запись сигналов от термопары и фотодетектора осуществлялась на систему сбора информации. Регистрацию сигналов производили с интервалом  $\sim 0.3$  s.



**Рис. 2.** (а) Температура льда (штриховая линия) и мощность проходящего линейно поляризованного видимого излучения через образец в зависимости от времени на длине волны 535 nm. Регистрируемая мощность представлена в единицах напряжения фотодетектора ( $U$ ). (б) Схема расположения базисной плоскости ( $B$ ) и ориентации вектора электрического поля ( $E$ ).

## Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерения мощности пропускания лазерного излучения в видимом диапазоне в зависимости от времени. В данном эксперименте вектор электрического поля волны находился в базисной плоскости кристаллов льда. Особенность результатов заключается в том, что при приближении льда к температуре фазового перехода происходит заметное кратковременное увеличение мощности регистрируемого сигнала приблизительно на 25%.

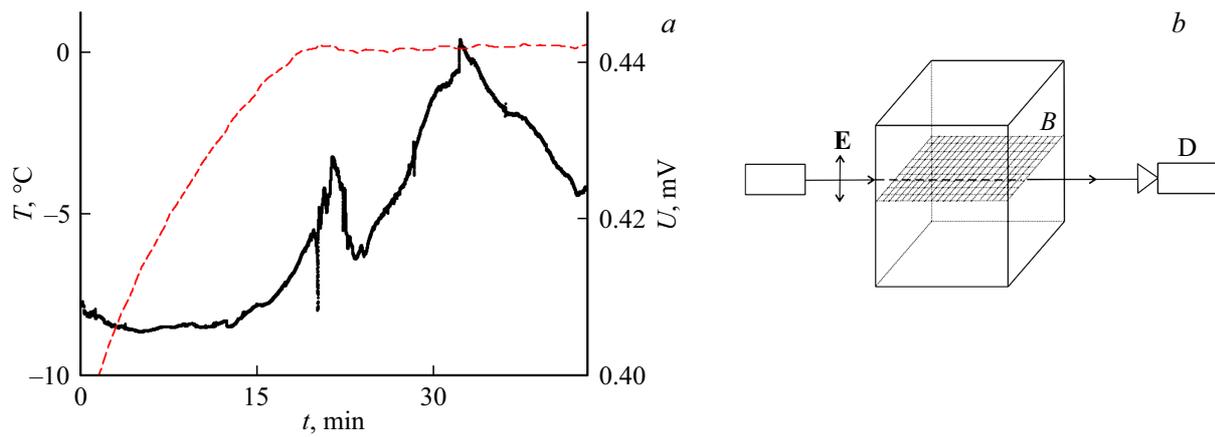
На рис. 3 приведены результаты аналогичных измерений для случая, когда вектор электрического поля волн перпендикулярен базисной плоскости кристаллов льда. Здесь приращение достигает 5%, но оно наблюдалось в процессе таяния и носило сложный характер от времени. В момент достижения температуры  $0^\circ\text{C}$  обнаружилось кратковременное уменьшение сигнала.

На рис. 4 представлены результаты измерений прохождения излучения в ультрафиолетовом диапазоне для неполяризованного излучения, но с вектором  $E$  в базисной плоскости. На рис. 4, а — графики температуры льда и проходящей мощности излучения, 4, б — расположение блока с выделенной преимущественной ориентацией базисной плоскости кристаллов пресного льда. Особенность графика для регистрируемой мощности: плавное его изменение в области температур  $-12 - -8^\circ\text{C}$  и резким приращением вблизи  $0^\circ\text{C}$  на  $\sim 23\%$ .

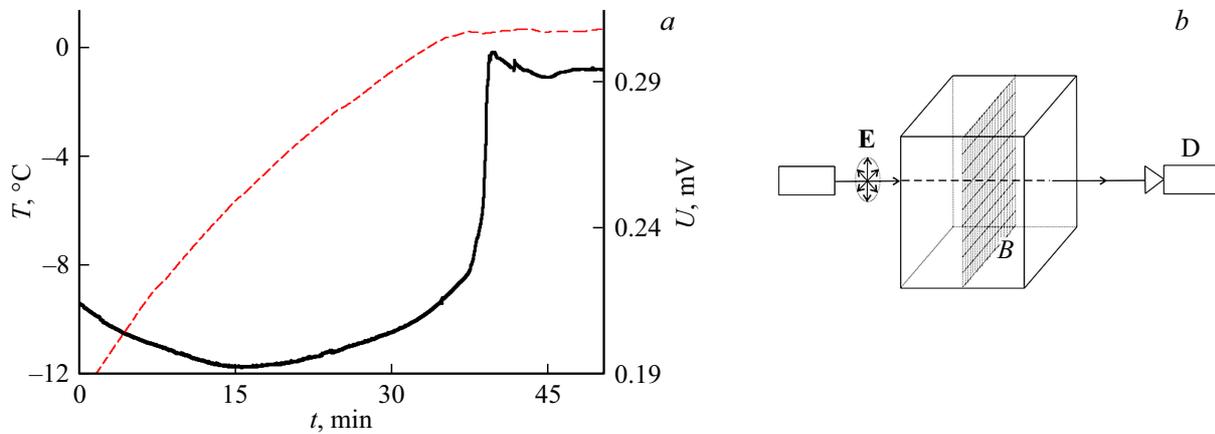
Для сравнения на рис. 5 представлены результаты измерений для случая, когда вектор электрического поля был хаотически расположен по отношению к базисным плоскостям кристаллов льда. График для пропускаемой мощности рис. 5 отличается от графика рис. 4 возникновением осцилляций мощности сигнала, которая начинается с уменьшения ее значения. Амплитуда осцилляций  $\sim 3\%$ .

Таким образом, в результате экспериментов по измерению затухания излучения в оптическом диапазоне на длинах волн 535 и 370 nm обнаружены особенности в виде существенных изменений мощности проходящего излучения перед началом таяния образца, структура которого содержит кристаллы с выделенной пространственной ориентацией главной оптической оси. Максимальный эффект наблюдали для случая расположения вектора  $E$  в базисной плоскости. Выделенная ориентация кристаллов характерна для льда, образовавшегося в природных условиях. В соответствии с принципом Кюри растущий лед повторяет симметрию окружающего пространства [14,15]. В случае ледяного покрова, из которого был изъят образец, это симметрия конуса, при которой ось „С“ ориентирована перпендикулярно поверхности раздела лед–вода.

Приращение мощности излучения достигало 25%. В некоторых экспериментах обнаруженный эффект напоминает „просветление“ среды при нанесении на поверхность, например, четвертьволнового слоя с промежуточным значением действительной части относительной диэлектрической проницаемости. Однако в данном случае физический механизм просветления представляется иным. Во-первых, известно, что при деформации сдвига в кристалле льда возникает нелинейная зависимость напряжения и деформации. При этом в области пластического течения возникает отрицательная дифференциальная вязкость [16]. Можно из общих соображений предположить, что в этом случае из-за наличия дипольных электрических моментов у молекул воды в слое, где происходит течение, может проявиться электрическая неустойчивость и возникнуть усиление электромагнитного излучения. Такие слои имеют нанометровую толщину, и они разделены плоскими кристаллическими пластинками толщиной порядка десятков нанометров [13]. Более конкретный механизм возрастания напряженности электрического поля можно связать с появлением поверхностных плазмонов на плоской



**Рис. 3.** (а) Результаты измерения мощности проходящего видимого излучения; (б) схема расположения блока льда; обозначения аналогичны рис. 2.



**Рис. 4.** (а) График проходящей мощности УФ излучения (в единицах напряжения на выходе детектора) от времени (сплошная линия) и температуры (штриховая линия); (б) расположение блока льда, отмечена базисная плоскость кристаллов в образце; обозначения аналогичны рис. 2.

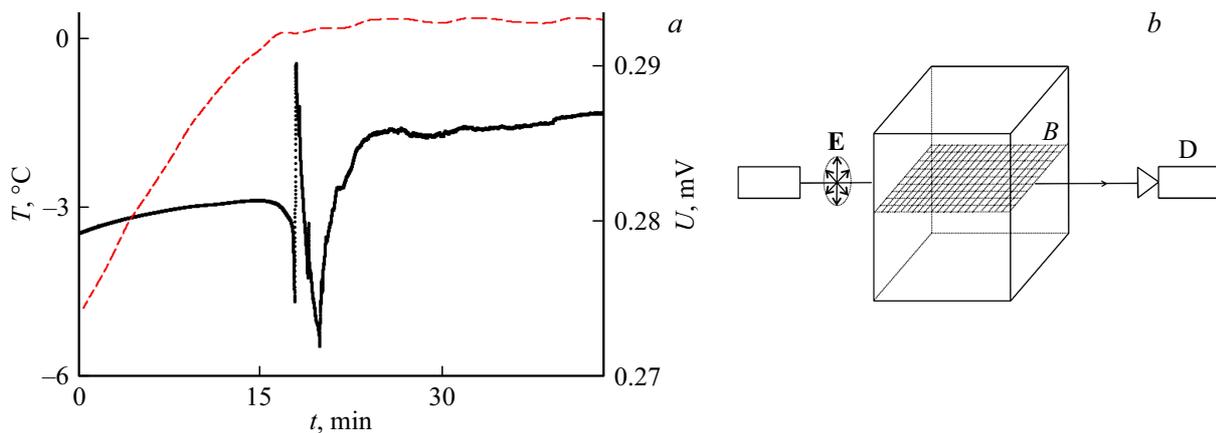
проводящей пленке или островковых пленках [17]. Проводимость на границе слоя, по которому происходит течение плоского кристаллического слоя, может возникать из-за сегнетоэлектрического упорядочения диполей среды. Можно предположить, что разорванные водородные связи приведут к ориентации диполей молекул воды в плоскости контакта сред. В свою очередь на контакте сегнетоэлектрика и диэлектрика возникает, как показано в [18], повышенная проводимость (на много порядков величины). В подтверждение такого возможного механизма усиления поля можно указать на открытие гигантского усиления комбинационного рассеяния излучения в присутствии металлических периодических или перколяционных наноструктур [19].

Кроме того, другая особенность проявилась в виде немонотонного изменения затухания при отрицательных температурах льда, когда блок начинали нагревать при помещении его в установку (например, это видно на рис. 4, а при температурах от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ). Данная особенность может быть также объяснена начинающей-

ся пластической деформацией, вызванной градиентом температуры в образце.

Как отмечалось выше, эффект просветления ранее наблюдали в микроволновом диапазоне [2]. При этом в [20] было установлено особое состояние поверхностных слоев льда. Его исследовали как при просвечивании образца, так и в резонаторе. Было найдено, что на стадии возрастания проходящей мощности излучения жидкая вода в образце отсутствовала, так как резонансная частота резонатора заметно не изменялась. В случае появления жидкой воды наблюдалось бы существенное уменьшение резонансной частоты и рост потерь резонатора. В [20] было высказано предположение, что обнаруженная особенность льда вблизи начала таяния связана с образованием проводящих перколяционных пленок или изменением свойств чистого льда при начале разрушения кристаллов в точке фазового перехода.

На рис. 5 в случае, когда вектор электрического поля не имел выделенного направления по отношению к базисной плоскости, интенсивность проходящего излуче-



**Рис. 5.** (а) График проходящей мощности на длине волны 370 nm (в единицах напряжения на выходе детектора (сплошная линия), график температуры (штриховая линия) от времени; (б) расположение блока льда; обозначения аналогичны рис. 2.

ния имела осциллирующий характер от времени. Однако в этом эксперименте в начальный момент деструкции льда наблюдали уменьшение проходящей мощности, что можно сопоставить с влиянием появившегося жидкого слоя на поверхности образца. Следует отметить, что из-за малого интервала температуры, когда проявляется эффект просветления, трудно определить момент начала таяния. Тем не менее по совокупности экспериментальных данных можно выделить эффект взаимодействия поля волны со слоями на базисных плоскостях (просветление) и эффект жидких пленок на поверхности образца (рост поглощения).

Вместе с тем требуется дальнейшее изучение вопроса из-за возможной неполной ориентации осей кристаллов в определенном выделенном направлении в исследуемом объекте, различием значений градиентов температуры в разных экспериментах и влиянием примесей и включений (концентрация солей, химические особенности и т.п.). В общем случае течение льда возможно не только по базисным плоскостям кристаллов, но для этого требуются механические напряжения на порядок выше [13].

## Заключение

1. В настоящей работе обнаружен эффект просветления льда перед началом его таяния, когда его механическая прочность минимальна на длинах волн 535 и 370 nm. Приращение мощности в наших опытах в образце толщиной 10 см достигало 25%. Аналогичный эффект был ранее обнаружен и в микроволновом диапазоне [2].

2. Эффект просветления проявляется в наибольшей степени, если вектор электрического поля волны во льду совпадал с базисной плоскостью кристаллов льда. Это было установлено при исследовании образцов природного льда, изъятых из ледяного покрова пресных водоемов.

3. Высказано предположение, что просветление среды может быть связано с образованием проводящих наноструктур на плоскостях кристаллов, по которым происходит пластическая деформация. Пластическое течение возникает из-за термических напряжений, наиболее выраженных вблизи температуры фазового перехода. Значительные вариации затухания, возможно, могут наблюдаться при любых механических воздействиях, при которых происходит течение льда.

4. Эффект изменения электромагнитных характеристик ледяных образований при механических напряжениях может использоваться при поляризационных измерениях процессов, происходящих в объектах криосферы как в оптическом, так и в микроволновом диапазоне.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] H. Han, Y. Li, W. Li, X. Liu, E. Wang, H. Jiang. *Water*, **15** (5), 889 (2023). DOI: 10.3390/w15050889
- [2] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов. *Письма в ЖТФ*, **35** (22), 46 (2009). [G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, S.D. Krylov. *Tech. Phys. Lett.*, **35** (11), 1047 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009110224].
- [3] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов. *Радиотехника и электроника*, **59** (6), 587 (2014). DOI: 10.7868/S0033849414060060
- [4] О.Ю. Лаврова, К.Р. Назирова, Я.О. Алферьева, П.Д. Жаданова, А.Я. Строчков. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **19** (5), 264 (2022). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283
- [5] К.А. Трошко, П.В. Денисов, Е.А. Дунаева, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, В.А. Толпин. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **19** (3), 302 (2022). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-302-311
- [6] Е.В. Заболотских, И.А. Гурвич, Б. Шапрон. *Исследование Земли из космоса*, **2**, 64 (2015).

- DOI: 10.7868/S0205961415020116 [E.V. Zabolotskikh, I.A. Gurvich, B. Chapron. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **51** (9), 1021 (2015). DOI: 10.1134/S0001433815090200].
- [7] Е.А. Гришин, Е.А. Павлова, Т.А. Алексеева, Е.У. Миронов. *Российская Арктика*, **2** (17), 72 (2022). DOI: 10.24412/2658-42552022-2-72-85
- [8] 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
- [9] D.K. Hall, G.A. Riggs, V.V. Salomonson. *Remote Sens. Environ*, **54**, 127 (1995).
- [10] S.G. Warren. *Appl. Opt.*, **23** (8), 1206 (1984).
- [11] S.G. Warren, R.E. Brandt. *J. Geophys. Res.*, **113** (D14220), 1 (2008). DOI: 10.1029/2007JD009744
- [12] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. Пер. с англ. С.Н. Брeуса. Под ред. Г.П. Мотулевич. 2-е изд. (Наука, М., 1973).
- [13] В.В. Богородский, В.П. Гаврило. *Лед: Физ. свойства. Современ. методы гляциологии* (Гидрометеониздат, Л., 1980).
- [14] П. Кюри. *О симметрии в физических явлениях: симметрия электрического и магнитного полей*. Избр. труды (Наука, М.-Л., 1966).
- [15] Г.С. Бордонский. *Электромагнитное излучение криогенных природных сред*. Автореф. докт. дис. (ЧИПР, Чита, 1994).
- [16] V.M. Petrenko, R.W. Whitworth. *Physics of ice* (Oxford Univ. Press., 2002).
- [17] В.В. Климов. *Наноплазмоника* (Физматлит, М., 2009).
- [18] S.M. Korobeunikov, A.V. Melekhov, Yu.G. Soloveitchik, M.E. Royak, D.P. Agoris, E. Pyrgioti. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38** (6), 915 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/021
- [19] С.О. Бояринцев, А.К. Сарачев. *ЖЭТФ*, **140** (6), 1103 (2011). [S.O. Boyarintsev, A.K. Sarychev. *J. Experimental and Theoretical Physics*, **113** (6), 963 (2011). DOI: 10.1134/S1063776111140123].
- [20] Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов. *Изв. вузов. Радиофизика*, **52** (3), 260 (2009). [G.S. Bordonsky, A.A. Gurulev, S.D. Krylov. *Radiophysics and Quantum Electronics*, **52** (3), 235 (2009). DOI: 10.1007/s11141-009-9122-2].