

Научная статья

УДК 556.113

DOI: 10.24412/2658-4255-2024-1-62-70



EDN: RRUJHY

Для цитирования:

Гурулев А.А., Бордонский Г.С.
Холодная вода и ее влияние
на электромагнитные свойства
криосферных объектов //
Российская Арктика. 2024.
Т. 6. № 1. С. 62-70.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-62-70>

Получена: 07.02.2024
Принята: 15.03.2024
Опубликована: 29.03.2024

For citation:

Gurulev A.A., Bordonskiy G.S.
Cold water and its effect on the
electromagnetic properties of
cryospheric objects. Russian
Arctic, 2024, vol. 6, no. 1,
pp. 62-70. (In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-62-70>

Финансирование.

Исследование не имело
спонсорской поддержки

**ХОЛОДНАЯ ВОДА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРИОСФЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ**А.А. Гурулев*  , Г.С. Бордонский 

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

E-mail: *lgc255@mail.ru**Аннотация**

В Арктической зоне широко распространена жидкая фаза воды в интервале температур $+4^{\circ}\text{C} \dots -70^{\circ}\text{C}$, где наблюдаются аномальные свойства объемной воды. Расположенную в этом диапазоне температур воду следует выделить в особый объект – холодную воду. Одним из примеров ее аномальных свойств является существование особой точки при температуре -45°C , где наблюдаются аномалии теплоемкости, коэффициента объемного расширения, скорости звука и адиабатической сжимаемости. Холодная вода может существовать в пористых природных средах. По этой причине, исследование электромагнитных характеристик увлажненных дисперсных сред при отрицательной температуре является актуальной задачей. В данной работе рассмотрены особенности электромагнитных характеристик увлажненных дисперсных сред в интервале температур $+4^{\circ}\text{C} \dots -70^{\circ}\text{C}$. Приведенные в работе результаты исследований различными методами, в том числе и при дистанционном зондировании Арктики из космоса, представляют интерес для изучения объектов криосферы, гидросферы и биосферы в переохлажденном состоянии и вблизи температуры замерзания воды.

Ключевые слова: холодная вода, аномалии физических характеристик, электромагнитные характеристики, микроволновый диапазон, дистанционное зондирование

COLD WATER AND ITS EFFECT ON THE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF CRYOSPHERIC OBJECTSА.А. Gurulev*  , Bordonskiy G.S. 

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

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

In the Arctic zone, the liquid phase of water is widespread in the temperature range of $+4^{\circ}\text{C} \dots -70^{\circ}\text{C}$, where anomalous properties of bulk water are observed. Water located in this temperature range should be classified as a special class of object – cold water. One example of its anomalous properties is the existence of a particular point at a temperature of -45°C , where anomalies in heat capacity, volumetric expansion coefficient, sound speed and adiabatic compressibility are observed. Cold water can exist in porous natural media. For this reason, the study of the electromagnetic characteristics of moistened dispersed media at negative temperatures is an urgent task. This work examines the features of the electromagnetic characteristics of moistened dispersed media in the temperature range $+4^{\circ}\text{C} \dots -70^{\circ}\text{C}$. The results of research presented in the work using various methods, including remote sensing of the Arctic from space, are of interest for studying objects of the cryosphere, hydrosphere and biosphere in a supercooled state and near the freezing point of water.

Keywords: cold water, anomalies of physical characteristics, electromagnetic characteristics, microwave range, remote sensing

Введение

Дистанционное зондирование Земли из космоса, в широком диапазоне частот позволяет решать ряд практических задач [1-3]. Не исключением является и мониторинг водных объектов и увлажненных природных дисперсных сред с искусственных спутников Земли. Особое внимание уделяется вопросам мониторинга арктической зоны России, что связано с развитием Северного морского пути, освоением месторождений в Арктике и Субарктике, а также с климатическими изменениями, происходящими на Земле, а именно - потеплением климата (примером может служить работа [4]). В 2021 и в 2023 годах были запущены спутники серии Арктика-М для выполнения вышеперечисленных задач [5]. Также есть ряд и других космических аппаратов, которые исследуют Арктическую и Субарктическую зоны России [6-7].

Для анализа получаемой информации активными или пассивными дистанционными методами необходимы знания об электромагнитных свойствах исследуемых объектов. Природные объекты состоят из смеси различных веществ, включающих в себя жидкую и твердую фазу. Для пористых сред (растительность, грунты и т.д.) характерной особенностью является заполнение пор водой. По своим свойствам поровая вода во многих случаях обладает свойствами объемной воды, что показано в работах [8-9]. Однако следует учитывать размер пор. Так, при диаметре пор меньше 2 нм, вода не будет обладать свойствами, присущими физическим свойствам объемной воды, в частности, объемной плотности. Данный эффект связывается с взаимодействием поверхности тела с молекулами воды [9].

Особенностью поровой воды является тот факт, что температура кристаллизации воды намного ниже температуры фазового перехода вода-лед при нормальном атмосферном давлении. Данное значение зависит от размеров пор и определяется из модифицированного уравнения Гиббса-Томсона [10]. Так, при размерах пор в виде цилиндров диаметром 2 нм температура фазового перехода лёд-вода составляет около -80°C [11]. Таким образом, температура воды в незамерзшем состоянии в Арктической зоне может находиться в довольно широком температурном интервале: от положительных (вода в свободном пространстве) и до довольно низких температур (вода в поровом пространстве). По этой причине знание электромагнитных свойств воды и, прежде всего, диэлектрической проницаемости в широком интервале частот, при отрицательных температурах является актуальной задачей.

Как известно, у воды есть ряд аномальных характеристик, например, значение максимальной плотности, которое достигается при нормальном атмосферном давлении при температуре $+4^{\circ}\text{C}$. В настоящее время известны 65 аномалий физико-химических свойств воды. Наибольшее признание для их объяснения получила двухструктурная модель воды, в которой структура жидкости представляется состоящей из двух видов кластеров LDL (low density liquid – вода низкой плотности) и HDL (high density liquid – вода высокой плотности) [12]. В новой модели, в отличие от предшествующих, кластеры непрерывно перестраиваются на пикосекундных временах и все свойства воды определяются взаимодействиями между кластерами.

Наиболее яркие аномалии воды проявляются для переохлажденной воды. Примером является открытие второй критической точки LLCP (liquid-liquid critical point) фазового перехода между LDL и HDL вблизи температуры -60°C и давлении ~ 100 МПа (точное значение этих параметров пока не установлено из-за больших экспериментальных трудностей). Со второй критической точкой связана расположенная в фазовом пространстве «давление-температура» линия Видома – локус повышенных флуктуаций энтропии и плотности [13]. Экспериментально установлено резкое возрастание значений ряда физических величин воды при приближении к линии Видома, например, теплоемкости при постоянном давлении, коэффициента объемного расширения, адиабатической сжимаемости и скорости звука. При давлении вблизи нормального атмосферного давления температура на линии Видома равна -45°C .

Влияние взаимодействия между двумя жидкостями высокой и низкой плотности сказывается и на электромагнитных свойствах. В работе [14] исследована взаимосвязь между макроскопической и микроскопической динамикой релаксации воды до терагерцовых частот и доказано наличие двух жидких форм в воде. В результате полученных данных была построена новая температурная модель диэлектрической проницаемости воды в широком частотном и температурном интервале. Однако представленная модель описывает диэлектрические характеристики воды в интервале от -5°C до температуры ее кипения при нормальном атмосферном давлении, что является недостатком теории, которая не позволяет дать описание глубоко переохлажденной воды.

Теоретические вопросы, связанные с холодной водой

Аномалии переохлажденной воды можно объединить в одну группу с общим свойством: а именно, с зависимостью плотности воды от температуры, которая в интервале от $+4^{\circ}\text{C}$ до -70°C уменьшается при охлаждении флюида. Этот температурный интервал охватывает как область переохлаждения, так и некоторый интервал положительных температур. Поэтому воду для температур ниже $+4^{\circ}\text{C}$ и выше -70°C можно объединить по данному признаку: $dp/dT > 0$ в один объект, который будем называть «холодная вода» (здесь dp/dT производная плотности по температуре) - рис.1. На рис. 1 область положительного значения производной плотности воды от термодинамической температуры выделена зеленым цветом. Штриховой линией на графике представлено поведение плотности обычной жидкости в зависимости от ее температуры. Как видно из рис. 1, температурная зависимость плотности холодной воды существенно отличается от поведения обычной жидкости, которая не обладает аномальными физико-химическими свойствами. Эта идея в неявной форме была высказана в работе [15].

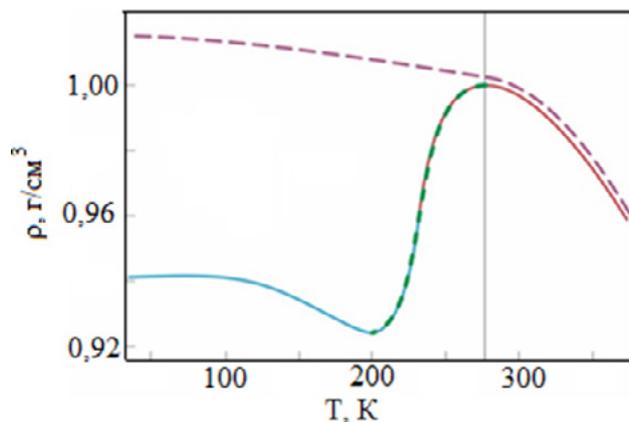


Рисунок 1. Зависимость плотности объемной воды в области температур, где проявляются ее наиболее яркие аномалии (на данном рисунке при давлении 0,1 МПа)

Холодная вода широко распространена на земной поверхности и в нижней атмосфере, она принимает участие в многочисленных биосферных процессах. Знание ее аномальных свойств по этой причине представляет большой интерес для развития методов дистанционного зондирования природной среды, а также объектов, состоящих из искусственных сред. Кроме уже известных аномалий тепловых и акустических величин в работах [16-17] было впервые обращено внимание на существование электрофизических аномалий холодной воды, в том числе в микроволновом диапазоне (например, диэлектрической проницаемости льдов на контактах с другими средами). Эти аномалии позволяют предложить новые методы бесконтактных электромагнитных измерений, в том числе с использованием аэрокосмических измерений и лабораторных методик интроскопии.

Для холодной воды можно выделить ряд особых температурных точек, которые были обнаружены в экспериментах или при компьютерном моделировании. На рис. 2 представлены известные и недавно обнаруженные особые температурные точки холодной воды.

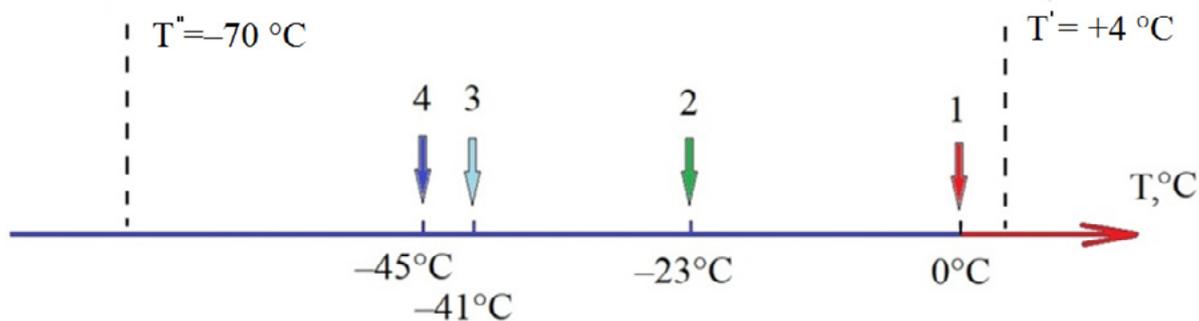


Рисунок 2. Особые температурные точки холодной воды (при давлении 0,1 МПа) в интервале $+4^{\circ}\text{C}$... -70°C . 1 – точка перехода жидкость – твердое тело, 2 – граница образования льда 0 из переохлажденной воды, 3 – температура гомогенной нуклеации, 4 – точка на линии Видома, исходящей из второй критической точки

Они представляют интерес для более тщательного изучения поведения разнообразных физико-химических величин в их окрестности. Кроме того, в интервалах между отмеченными температурами можно ожидать открытие новых физических особенностей холодной воды. Это связано с тем, что по результатам теоретических исследований в данной области температур наблюдается переход от преобладающих концентраций двух видов кластеров воды LDL и HDL – рис. 3.

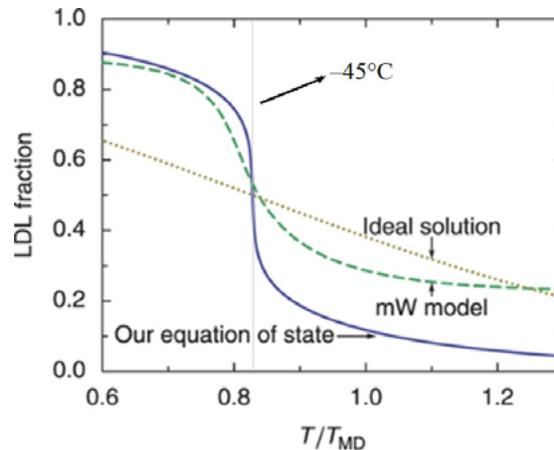


Рисунок 3. Концентрации LDL, HDL в зависимости от температуры по данным из работы [18]; температура нормирована на температуру замерзания воды при нормальном атмосферном давлении. (Ideal solution – идеальная смесь, mW – известная компьютерная модель для расчетов структуры воды, Our equation of state – уравнение состояния авторов из статьи [18])

Точка $+4^{\circ}\text{C}$ – максимум плотности воды; температура -23°C (точка 2 на рис. 2) соответствует точке фазового превращения воды в лед 0, кристаллическую модификацию льда, элементарная решетка которого состоит из 12 молекул воды. Лед 0 был открыт при компьютерном моделировании [19] и его существование впервые экспериментально подтверждено в работе [20]. Этот лед является сегнетоэлектриком, что позволило предложить оригинальный метод его обнаружения.

На рис. 2 выделены также следующие характерные температуры. 1 – точка перехода жидкость–твердое тело при нормальном атмосферном давлении. Точка 3 характеризует температуру гомогенной нуклеации, которая характеризует для воды без примесей температуру кристаллизации, которая происходит за счет флуктуационного образования зародышей кристаллов льда. Данная температура принимает значение около -41°C ... -42°C . Однако в работе [21] обнаружена жидкая фаза воды в туманах над Гренландией при более низких температурах, чем температура гомогенной нуклеации воды, а в работе [22] при использовании метода испарения капель воды микронных размеров в вакууме удалось достичь температуры -46°C . 4 – температура, расположенная на линии Видома, исходящей из второй критической точки. Физико-химические свойства холодной воды в крайних точках интервала практически не исследованы, особенно для температуры -70°C .

Предлагаемые методики электромагнитных измерений сред, содержащих холодную воду и некоторые полученные результаты

На основании методики выявления льда 0, связанной со свойством этого льда образовывать на контакте с диэлектриком высоко проводящие слои и резко изменять микроволновые характеристики дисперсных сред, была предложена новая дистанционная методика обнаружения ледяных частиц нанометровых диаметров в разряженной атмосфере. Эта методика основана на возникновении сверхтонких высоко проводящих слоев на границе сегнетоэлектрического льда 0 с любым другим диэлектриком. Такой эффект первоначально исследовали в работе [23]. В наибольшей степени он проявляется при распространении микроволнового излучения через ансамбль нано или микрочастиц, покрытых льдом 0. При этом была высказана гипотеза о причинах свечения «серебристых» облаков, появляющихся в мезосфере на высотах 80 км...90 км [24]. В приземных областях признаки льда 0 были обнаружены в ветках сосны при циклических суточных изменениях температуры воздуха, если имеет место переход через значение -23°C [25].

Кроме зондирования статических объектов, свойства которых мало изменяются за время наблюдений, были обнаружены динамические явления в ледяных структурах при механических напряжениях, приводящих к пластической деформации объекта.

Оказалось, что в таких системах возникает процесс самоорганизации и появляются волны пластической деформации. Их характерные длины в пресном поликристаллическом льде – 0,8 см...2 см. Они были зарегистрированы в специальных экспериментах по радиопросвечиванию как природного ледяного покрова, так и образцов льда в лабораторных условиях. На основании выполненных экспериментальных работ был предложен метод радарного определения подготовки схода ледников при измерениях с использованием аппаратуры, установленной на космических аппаратах [26]. Идея метода заключается в том, что образовавшиеся волны течения состоят из чередующихся кристаллических и аморфных областей, из которых характеристики последних близки к холодной воде. Следовательно, такие волны течения создают дифракционные решетки, рассеивающие внешние излучения.

Исследованы также некоторые химические превращения растворов в порах силикатных материалах при температурах от 0 °С до –60 °С. Сорбенты использовали для получения глубокого переохлаждения поровой воды. При значениях температуры исследуемой среды около –45 °С наблюдали заметное изменение скорости химических реакций, например хемосорбции водорода (рис. 4), разложения йодистого калия и пероксида водорода (рис. 5). При опытах использовали методики спектроскопических измерений, проходящего через образцы микроволнового излучения, в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Теоретическое обоснование результатов было представлено в работе [27].

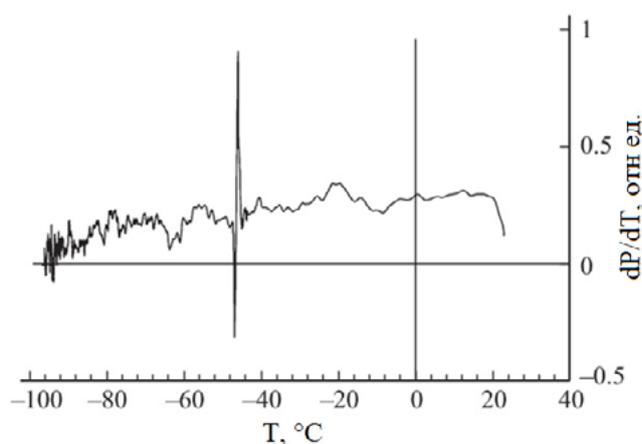


Рисунок 4. Изменение производной проходящей мощности микроволнового излучения (P) на частоте 34 ГГц через образец слабо увлажненного силикагеля, находящегося в атмосфере водорода, в зависимости от температуры

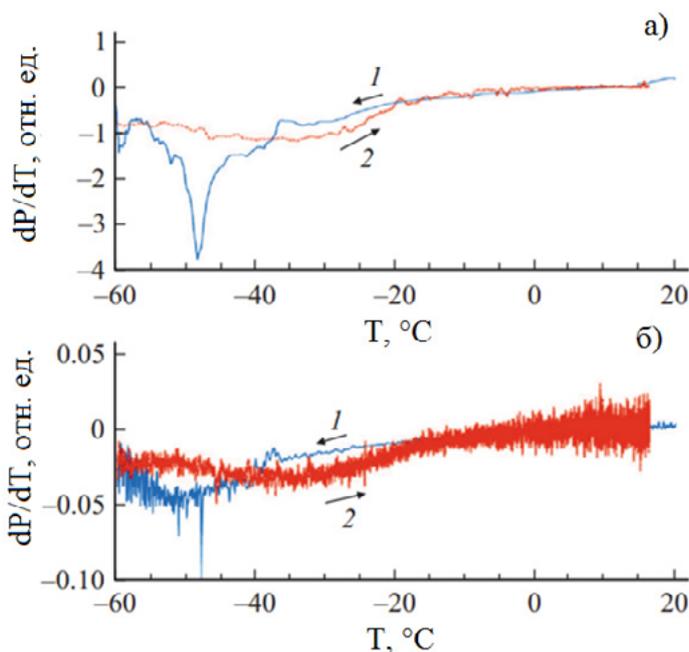


Рисунок 5. а – зависимость производной отраженной мощности микроволнового излучения от температуры образца, увлажненного раствором гидроперита, при усреднении в 1000 точках. б – аналогичная зависимость для другого образца при усреднении по 500 точкам. 1 – для участка охлаждения, 2 – для участка нагревания. Стрелками показано направление изменения температуры

Выводы

Выделение особого объекта «холодная вода» представляется перспективным для выбора направлений исследования по поиску новых необычных свойств воды в криосфере, гидросфере и биосфере. В настоящее время слабо исследованы разнообразные электрофизические, в том числе микроволновые характеристики природных и искусственных образований, содержащие холодную воду, которые могут быть использованы при разработке новых методов аэрокосмического дистанционного зондирования в Арктике и Субарктике. Здесь можно выделить верхний интервал температур холодной воды от 0 до 4 градусов Цельсия, физико-химические особенности воды, в котором практически не исследованы. То же для других интервалов температур, например, для $-45...-70$ градусов Цельсия. Такая задача важна для полярных районов планеты. Кроме задач дистанционного зондирования, например, мониторинга природной среды интересны проблемы спектроскопии материалов и интроскопии, поскольку имеется много вопросов о поведении холодной воды и ее растворов в природных и искусственных средах. Характеристики холодной воды интересны не только для исследований сред в земных условиях, но и для зондирования холодных планет и их спутников Солнечной Системы.

Список литературы:

1. Костяной А.Г., Костяная Е.А., Лаврова О.Ю. Спутниковый мониторинг ледяного покрова в районе Керченского пролива // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 195-204. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204
2. Loupian E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. A study of the dependence of the degree of forest damage by fires on the intensity of burning according to satellite-monitoring data // Cosmic Research. 2022. Vol. 60. Issue S1. P. S46-S56. DOI: 10.1134/s001095252270006x
3. Лупян Е.А., Константинова А.М., Кашницкий А.В., Ермаков Д.М., Саворский В.П., Панова О.Ю., Бриль А.А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для оценки их влияния на окружающую среду // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213
4. Репина И.А., Тихонов В.В. Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 15-30. DOI: 10.24411/2658-4255-2018-00015
5. Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Хайлов М.Н., Ширшаков А.Е., Шумаков И.А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11-26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26
6. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в северном ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22-38. DOI: 10.31857/S0205961421060026
7. Emery W., Camps A. Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application. Elsevier Inc., 2017. 856 p.
8. Castrillón R.-V.S., Giovambattista N., Aksay I. A., Debenedetti, P. G. Structure and Energetics of Thin Film Water // The Journal of Physical Chemistry C. 2011. Vol. 115. Issue 11. P. 4624–4635. DOI: 10.1021/jp1083967
9. Almeida A.B., Buldyrev S.V., Alencar A.M., Giovambattista N. How Small Is Too Small for the Capillarity Theory? // The Journal of Physical Chemistry C. 2021. Vol. 125. Issue 9. P. 5335–5348. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c11140
10. Schreiber A., Kotelsen I., Findenegg G.H. Melting and freezing of water in ordered mesoporous silica materials // Phys. Chem. Chem. Phys. 2001. Vol. 3. P. 1185-1195. DOI: 10.1039/b010086m
11. Limmer D.T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores // J. Chem. Phys. 2012. Vol. 137. P. 044509/11. DOI: 10.1063/1.4737907
12. Johari G. P., Teixeira J. Thermodynamic Analysis of the Two-Liquid Model for Anomalies of Water, HDL–LDL Fluctuations, and Liquid–Liquid Transition // The Journal of Physical Chemistry B. 2015. Vol. 119. Issue 44. P. 14210–14220. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b06458

13. Perakis F., Amann-Winkel K., Lehmkuhl F., Sprung M., Mariedahla D. [et al.] Diffusive dynamics during the high- to low-density transition in amorphous ices // Proc. Natl. Acad. Sci. 2017. Vol. 114. P. 8193–8198. DOI: 10.1073/pnas.1705303114
14. Vinh N.Q., Doan L.C., Hoang N.L.H., Cui J.R., Sindle B. Correlation between macroscopic and microscopic relaxation dynamics of water: Evidence for two liquid forms // J Chem Phys. 2023. Vol. 158. Issue 20. P. 204507. DOI: 10.1063/5.0142818
15. Анисимов М.А. Холодная и переохлажденная вода как необычный сверхкритический флюид // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2012. Т. 7. № 2. С.19-37.
16. Бордонский Г.С., Орлов А.О., Хапин Ю.Б. Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлажденной объемной воды в интервале температур 0...–90 °С на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 255-270.
17. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А. Лед 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 263-273. DOI: 10.31857/S2076673420020039
18. Holten V., Anisimov M.A. Entropy-driven liquid-liquid separation in supercooled water // Scientific Reports. 2012. Vol. 2. SP. 713. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep00713>
19. Russo J., Romano F., Tanaka Y. New metastable form of ice and its role in the homogenous crystallization of water// Nature Materials. 2014. Vol. 13. Issue 7. P. 733-739. DOI: 10.1038/nmat3977
20. Бордонский Г.С., Орлов А.О. Признаки возникновения льда 0 в увлажненных нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 105. № 8. С. 483-488.
21. Cox C.J., Noone D.C., Berkelhammer M., Shupe M.D., Neff W.D., Miller N.B., Walden V.P., Steffen K.: Supercooled liquid fogs over the central Greenland Ice Sheet // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. Vol. 19. P. 7467–7485. DOI: 10.5194/acp-19-7467-2019
22. Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmono H. [et al.] Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature // Nature. 2014. Vol.19. Issue 510. P.381-384. DOI: 10.1038/nature13266
23. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Soloveitchik Yu.G., Royak M.E., Agoris D.P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journ. of Physics. D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. Issue 6. P. 915-921. DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/021
24. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Methods of microwave radiometric studies of mesospheric clouds // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 26. «26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics» 2020. P. 115601S. DOI: 10.1117/12.2575543
25. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.Б. Вариации микроволновых потерь в ветках сосны при отрицательных температурах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 120-129. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-120-129
26. Патент № 2742051 С1 РФ, МПК G01S 13/02. Способ определения начальной стадии деформации наблюдаемого с космического аппарата ледника / А.А. Гурулев, Г.С. Бордонский, А.О. Орлов. № 2020104654: заявл. 31.01.2020: опубл. 02.02.2021
27. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. О физико-химических превращениях с участием воды вблизи температуры –45°С // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. Т.21. № 4. С.478-489. DOI: 10.17308/kcmf.2019.21/2359

References:

1. Kostianoy A.G., Kostianaia E.A., Lavrova O.Yu. Sputnikovyy monitoring ledjanogo pokrova v rajone Kerchenskogo proliva [Satellite monitoring of the ice cover in the area of the Kerch Strait]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 6, pp. 195-204. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-195-204
2. Loupian E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. A study of the dependence of the degree of forest damage by fires on the intensity of burning according to satellite-monitoring data. *Cosmic Research*, 2022, vol. 60, issue S1, pp. S46-S56. DOI: 10.1134/s001095252270006x

3. Loupian E.A., Konstantinova A.M., Kashnitskii A.V., Ermakov D.M., Savorskiy V.P., Panova O.Yu., Bril A.A. Vozmozhnosti organizacii dolgovremennogo distantsionnogo monitoringa krupnyh istochnikov antropogennyh zagryaznenij dlja ocenki ih vlijanija na okruzhajushhuyu sredu [The possibilities of organizing long-term remote monitoring of large sources of anthropogenic pollution to assess their impact on the environment]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 193-213. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213
4. Repina I.A., Tikhonov V.V. Melt pond on the sea ice surface during summer and its connection with Arctic climate change. *Russian Arctic*, 2018, no. 2., pp. 15-30. (In Russian). DOI: 10.24411/2658-4255-2018-00015
5. Asmus V.V., Milekhin O.E., Kramareva L.S., Khailov M.N., Shirshakov A.E., Shumakov I.A. Arktika-M: the world's first highly elliptical orbit hydrometeorological space system. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, vol. 46, issue 12, pp. 805-816. DOI: 10.3103/S1068373921120013
6. Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Tikhonov V.V., Smolyanitsky V.M., Afanasyeva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analiz oblastej morskogo l'da v Severnom Ledovitom Okeane, neopredeljaemyh algoritmom ASI po dannym sputnikovoj mikrovolnovoj radiometrii [Analysis of sea ice areas undetectable by satellite microwave radiometry (ASI algorithm) in the Arctic Ocean]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, no. 6, pp. 22-38. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961421060026
7. Emery W., Camps A. Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Application. Elsevier Inc., 2017, 856 p.
8. Castrillón R.-V.S., Giovambattista N., Aksay I. A., Debenedetti, P. G. Structure and Energetics of Thin Film Water. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, vol. 115, issue 11, pp. 4624–4635. DOI: 10.1021/jp1083967
9. Almeida A.B., Buldyrev S.V., Alencar A.M., Giovambattista N. How Small Is Too Small for the Capillarity Theory? *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, vol. 125, issue 9, pp. 5335–5348. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c11140
10. Schreiber A., Kotelsen I., Findenegg G.H. Melting and freezing of water in ordered mesoporous silica materials. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2001, vol. 3, pp. 1185-1195. DOI: 10.1039/b010086m
11. Limmer D.T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores. *J. Chem. Phys*, 2012, vol. 137, pp. 044509/11. DOI: 10.1063/1.4737907
12. Johari G. P., Teixeira J. Thermodynamic Analysis of the Two-Liquid Model for Anomalies of Water, HDL–LDL Fluctuations, and Liquid–Liquid Transition. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2015, vol. 119, issue 44, pp. 14210–14220. DOI:10.1021/acs.jpcc.5b06458
13. Perakis F., Amann-Winkel K., Lehmkuhl F., Sprung M., Mariedahla D. [et al.] Diffusive dynamics during the high- to low-density transition in amorphous ices. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2017, vol. 114, pp. 8193–8198. DOI: 10.1073/pnas.1705303114
14. Vinh N.Q., Doan L.C., Hoang N.L.H., Cui J.R., Sindle B. Correlation between macroscopic and microscopic relaxation dynamics of water: Evidence for two liquid forms. *J. Chem. Phys.*, 2023, vol. 158, issue 20, pp. 204507. DOI: 10.1063/5.0142818
15. Anisimov M.A. Holodnaja i pereohlazhdennaja voda kak neobychnyj sverhkriticheskij fljuid [Cold and supercooled water: a novel supercritical-fluid solvent]. *Sverhkriticheskie fljuidy: teorija i praktika*, 2012, vol. 7, no. 2, pp.19-37. (In Russian).
16. Bordonskiy G.S., Orlov A.O., Khapin Yu.B. Attenuation coefficient and dielectric permittivity of supercooled volume water in the temperature range 0...–90 °C at frequencies 11...140 GHz. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 255-270. (In Russian).
17. Bordonskiy G.S., Krylov S.D., Gurulev A.A. Led 0 v prirodnoj srede. jeksperimentalnye dannye i predpolagaemye oblasti ego sushhestvovanija [Ice 0 in the natural environment. experimental data and assumed areas of its existence]. *Led i sneg*, 2020, vol. 60, no. 2. pp. 263-273. (In Russian). DOI: 10.31857/S2076673420020039
18. Holten V., Anisimov M.A. Entropy-driven liquid-liquid separation in supercooled water. *Scientific Reports*, 2012, vol. 2, sp. 713, 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep00713>
19. Russo J., Romano F., Tanaka Y. New metastable form of ice and its role in the homogenous crystallization of water. *Nature Materials*, 2014, vol. 13, issue 7, pp. 733-739. DOI: 10.1038/nmat3977
20. Bordonskiy G.S., Orlov A.O. Signatures of the appearance of ice 0 in wetted nanoporous media at electromagnetic measurements. *JETP Letters*, 2017, vol. 105, no. 8, pp. 492-496. DOI: 10.1134/S0021364017080021

21. Cox C.J., Noone D.C., Berkelhammer M., Shupe M.D., Neff W.D., Miller N.B., Walden V.P., Steffen K.: Supercooled liquid fogs over the central Greenland Ice Sheet. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19, pp. 7467–7485. DOI: 10.5194/acp-19-7467-2019, 2019
22. Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmono H. [et al.] Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature. *Nature*, 2014, vol.19, issue 510, pp. 381-384. DOI: 10.1038/nature13266
23. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Soloveitchik Yu.G., Royak M.E., Agoris D.P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil. *Journ. of Physics. D: Applied Physics*, 2005, vol. 38, issue 6, pp. 915-921. DOI: 10.1088/0022-3727/38/6/021
24. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Methods of microwave radiometric studies of mesospheric clouds. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 26. "26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics", 2020, pp. 115601S. DOI: 10.1117/12.2575543
25. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Variacii mikrovolnovykh poter v vetkah sosny pri otricatelnykh temperaturah [Variation of microwave losses in pine branches at negative temperatures]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 120-129. (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-120-129
26. Gurulev A.A., Bordonskiy G.S., Orlov A.O. Sposob opredeleniya nachal'noj stadii deformacii nabljudаемого s kosmicheskogo apparata lednika [Method of determining initial stage of deformation of glacier observed from spacecraft]. Patent RF no. 2742051 C1, no. 2020104654, G01S 13/02. (In Russian).
27. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A. O fiziko-himicheskikh prevrashheniyah s uchastiem vody vblizi temperatury $-45\text{ }^{\circ}\text{S}$ [Regarding physical and chemical transformations with the involvement of water near $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granicy*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 478-489. (In Russian). DOI: 10.17308/kcmf.2019.21/2359