

Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях

А. А. Гурулев, Г. С. Бордонский, А. О. Орлов

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

Рассмотрены особенности радиолокационной регистрации состояния ледяных структур при пластической деформации. Они основаны на определении повышения интенсивности рассеянного микроволнового излучения, особенно в спектральном интервале — на частотах 13–14 ГГц. Эффект определяется длиной автоволн пластического течения с характерным значением порядка одного сантиметра. Автоволны образуют во льду хаотически распределённые, изменяющиеся во времени под действием механических напряжений наборы дифракционных решёток. При анализе радарных космоснимков ледяного покрова оз. Шакшинского (Забайкальский край), полученных со спутника Sentinel-1B, на одном из них было обнаружено повышенное значение коэффициента обратного рассеяния. Эффект связывается с проявлением автоволн пластического течения при сильных суточных изменениях термодинамической температуры ледяного покрова. Предложено использование метода радарной регистрации волн течения как предвестника схода пульсирующих ледников по усилению рассеянного излучения от объекта при сравнительных измерениях.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, ледяные структуры, автоволны пластического течения, текучесть льда, радиолокация

Одобрена к печати: 27.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-222-229

Введение

Известно, что криосферные образования чувствительны к внешним воздействиям. Примером динамичных ледяных образований выступают пульсирующие ледники (Долгушин, Осипова, 1982; Кокин, 2011), подвижки которых могут приводить к катастрофическим последствиям. Так, 20 сентября 2002 г. в результате схода пульсирующего ледника Колка погибло более сотни человек, был уничтожен пос. Нижний Кармадон и несколько баз отдыха (Котляков и др., 2003). Следует отметить, что только на Памире ежегодно в активной стадии подвижек находится не менее десяти ледяных образований (Котляков и др., 2021). Причём от начала образования кинематических волн в леднике до полной стадии завершения его подвижек в отдельных случаях может пройти до пяти лет. Но иногда резкая разрядка напряжения в леднике может произойти в непредсказуемый момент времени, что и случилось с ледником Колка (Котляков и др., 2003). По этой причине необходимо оперативно исследовать динамику состояния ледников. При этом возникает вопрос об определении предвестников возникновения критических состояний крупных масс льда, которые можно эффективно регистрировать существующими методами дистанционного зондирования. Цель данного исследования — предложить метод оперативного выявления критического состояния крупных масс льда, а также прогнозирования их разрушения.

Обоснование нового метода регистрации неустойчивого состояния ледяных образований

В настоящее время широко используются разнообразные дистанционные методы исследования криосферных образований в различных диапазонах: видимом (Котляков и др., 2021), инфракрасном (Lo Vecchio et al., 2019), радио- (Мачерет и др., 2019) и микроволно-

вом (Бордонский и др., 2016; Тихонов и др., 2015; Shokr, Sinha, 2015). Интересно отметить, что при радиозондировании ледников было обнаружено множество аномалий (Богородский и др., 1983), которые авторам не удалось объяснить. Неявно они были приписаны процессам таяния в объёме или на границах с другими средами (водой, твёрдой поверхностью).

В работе (Бордонский и др., 2012) при радиопросвечивании ледяных покровов пресных озёр было обнаружено влияние температурных напряжений и деформаций на электромагнитные характеристики льда в микроволновом диапазоне. Возникающие аномалии были объяснены возникновением автоволн пластического течения (Бордонский, Гурулев, 2019). Аналогичные волны были впервые подробно теоретически и экспериментально исследованы сотрудниками Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) для металлов (Зуев, 2018; Зуев, Хон, 2021). В выполненных исследованиях было показано, что на макроуровне в образцах из металлов возникают автоволны локализованной пластичности. Длины волн находятся в интервале от 0,5 до 2 см. Скорость их распространения мала и составляет $\sim 10^{-5} \dots 10^{-6}$ м/с. Они представляют собой чередование областей с практически недеформированной кристаллической структурой и активных областей, в которых развивается пластическая деформация. В цитируемых работах автоволны течения были экспериментально обнаружены при помощи оптических методов спекл-фотографии на поверхности образцов из металлов при их пластической деформации. В отличие от работ Л. Б. Зуева с соавторами в наших работах волны течения были исследованы для ледяных структур, прозрачных в радиодиапазоне, в том числе микроволновом. Эта особенность, на наш взгляд, важна для развития методов спектроскопии при структурных исследованиях льда.

Появление новых представлений о пластичности кристаллических ледяных тел и образование в них периодических структур открывает возможности определения внутренних динамических неоднородностей объектов криосферы, вызванных внешними тепловыми и механическими воздействиями.

Пластическая деформация кристаллических тел на любой стадии, как было установлено, приводит к локализации этой деформации. При этом чередование областей упругой деформации кристалла и пластического течения представлено в виде фрагментов дифракционных решёток для электромагнитных волн. Дифракционная решётка образуется изменением коэффициента преломления для двух состояний льда. На *рис. 1* представлена упрощённая схема автоволны локализованной пластичности с двумя состояниями среды: в виде деформируемых и недеформируемых полос (при растяжении тонкой пластины). Реальная картина существенно более сложная, её можно представить в виде хаотически распределённых в пространстве макроскопических дифракционных решёток с изменяющимися во времени параметрами. Скорость изменения во времени параметров решётки определяется характером изменения напряжения в среде и может изменяться в широких пределах.

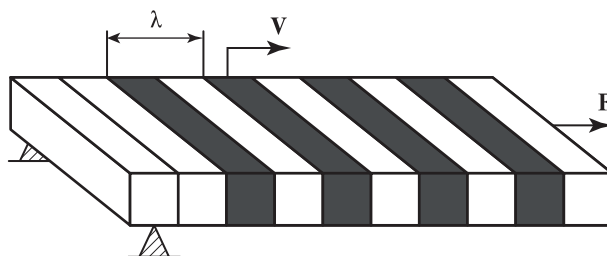


Рис. 1. Тонкая пластина, выделенная из объёма кристаллического тела, с чередованием областей отсутствия пластического течения (светлые полосы) и подвергающихся пластическому течению (тёмные полосы); λ — длина волны, v — скорость распространения волны течения, F — растягивающая сила

В ледяном покрове за счёт возникновения в нём механических напряжений, например термического сжатия или растяжения, во время значительного изменения суточной температуры окружающей среды могут возникнуть вышеописанные дифракционные решётки.

Постоянная такой решётки составляет несколько сантиметров, что даёт возможность регистрации решётки в микроволновом диапазоне за счёт усиления или ослабления отражённого электромагнитного излучения. Таким образом, можно зафиксировать начальные подвижки ледяного покрова, которые будут проявляться в виде автоволн пластического течения. На этом принципе основывается предлагаемый метод обнаружения начальной стадии неустойчивого состояния ледяных структур.

Экспериментальное обнаружение волн течения в пресном ледяном покрове

Для обнаружения автоволн пластического течения нами были проанализированы радиолокационные изображения пресного ледяного покрова оз. Шакшинского, расположенного в Забайкальском крае. Данный водоём находится на высоте 964 м н. у. м. (над уровнем моря), площадь водоёма составляет 51,8 км², минерализация исходных вод — около 120 мг/л. В зимний период озеро покрыто льдом, толщина которого достигает 150 см. Ввиду небольшой глубины озеро представляется эвтрофированным, в нём происходит захват в ледяной покров фрагментов высшей водной растительности, которые влияют на его микроволновые и механические характеристики.

Для Забайкальского края наблюдаются значительные вариации дневной и ночной температуры, доходящие до 20 °С. Кроме того, из-за невысокого снежного покрова возникают термические напряжения, благоприятные для возникновения автоволн течения.

В результате анализа изменения температуры воздуха в районе оз. Шакшинское нами были определены даты в зимний период, когда приращения температуры достигали максимальных значений. Как правило, для Забайкалья это январь. На *рис. 2* приведены данные измерений температуры приземного слоя атмосферы за январь 2017 г., полученные с метеостанции, расположенной в пос. Кадала. Эта метеостанция находится на расстоянии около 40 км от исследуемого озера. Значения разности между ночной и дневной температурой у исследуемого водоёма и на метеостанции практически совпадают.

В указанный год самая низкая температура зафиксирована 22 января. В этот же день наблюдался максимальный разброс величин дневной и ночной температуры, который составлял 20 °С. Толщина ледяного покрова озера достигала одного метра, а толщина снежного покрова составляла порядка 10 см. Минерализация льда в средней части по высоте покрова принимала значение около 1 мг/кг.

Радиолокационные изображения исследуемого водоёма были получены со спутника Sentinel-1В на частоте 5,4 ГГц в 2017 г. в моменты, когда изменения ночной и дневной температуры достигали максимального значения (см. *рис. 2*). На *рис. 3* (см. с. 225) приведены

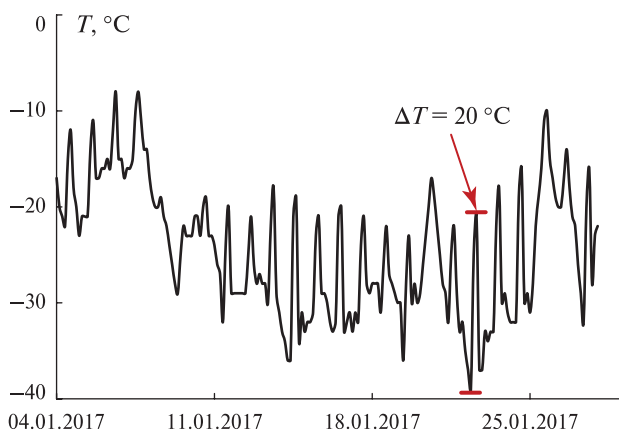


Рис. 2. Изменение температуры воздуха в январе 2017 г., г. Чита (метеостанция пос. Кадала)

результаты измерения пространственного распределения коэффициента обратного рассеяния на частоте 5,4 ГГц на VV-поляризации (излучение и приём на вертикальной поляризации).

Как видно из *рис. 3*, 22 января 2017 г., когда суточное приращение температуры приземного воздуха достигало максимального значения и наблюдалась минимальная его температура, на ледяном покрове проявились области с повышенным коэффициентом обратного рассеяния. Среднее значение различий коэффициента обратного рассеяния между снимками (исключая небольшую прибрежную область) составляет ~3–5 дБ.

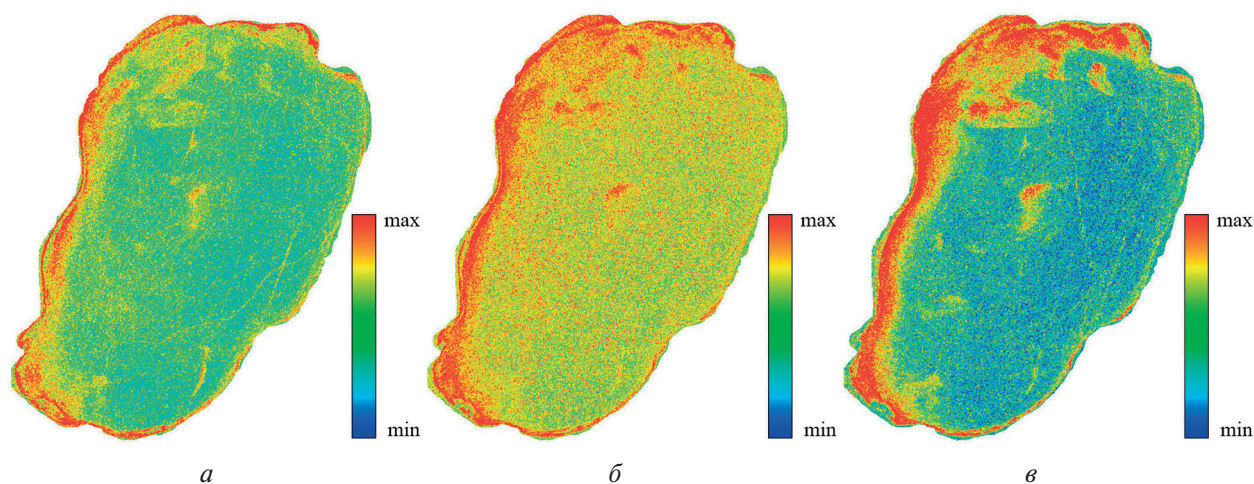


Рис. 3. Радиолокационное изображение оз. Шакшинское, спутник Sentinel-1B, VV-поляризация: а — 17 декабря 2016 г.; б — 22 января 2017 г.; в — 27 февраля 2017 г.

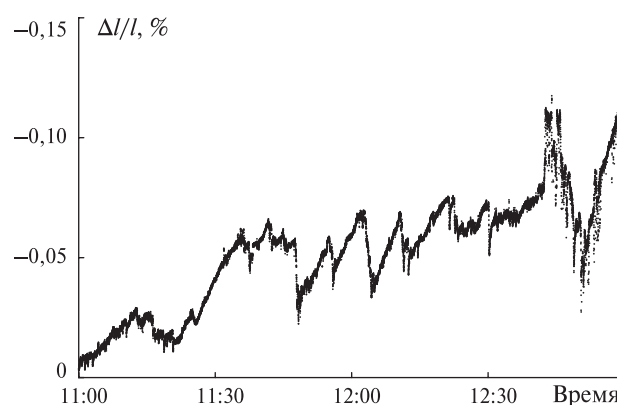
В другие дни по имеющимся изображениям за три месяца данного эффекта не наблюдалось. Это становится важным доказательством возникновения автоволн пластического течения в пресном ледяном покрове, которые появились за счёт термических напряжений при больших колебаниях суточной температуры.

Кроме того, на снимках хорошо прослеживаются области с повышенным значением коэффициента обратного рассеяния: это береговая зона и центральное яркое пятно. В работе (Бордонский и др., 2014) описана причина данного явления. В центральной части озера было зарегистрировано повышенное содержание газовых включений в ледяном покрове, соизмеримых с длиной волны, а в береговой области это связано с захватом высшей водной растительности в лёд во время его образования и роста.

Автоволны пластического течения были обнаружены также прямыми измерениями. Такие исследования проводились нами со специально разработанным электромагнитным датчиком для устранения погрешности, определяемой контактными флуктуациями датчиков сигнала. Первоначально опорные точки датчика устанавливали на расстоянии 1 м, однако деформации в виде волн не удавалось зарегистрировать. Возможно, это было связано с тем, что на таком расстоянии образовалось ~ 100 волновых изменений среды, которые при сложении нивелировали продольные изменения длины (l) из-за волн течения. В последнем эксперименте использовали опорные точки на расстоянии около 1,5 см. Измеритель деформации был расположен в небольшом углублении от поверхности ледяного покрова вблизи берега озера и ориентирован перпендикулярно к береговой линии по направлению запад – восток. Чувствительность измерителя составляла ~ 1 мкм.

Результаты нового эксперимента представлены на рис. 4. Они были выполнены в период значительных колебаний суточной температуры с изменением направления вектора градиента температуры в верхнем слое покрова толщиной до 15 см. Представлено состояние сжатия области льда, где был установлен измеритель деформации. За 2 ч измерений сжатие составило $\sim 0,1\%$ от начального расстояния между опорными точками.

Рис. 4. Выборка записи сигнала электромагнитного измерителя деформации от времени 5 марта 2023 г. на участке сжатия области льда с измерителем деформации



Как следует из *рис. 4*, в некоторые временные интервалы обнаруживаются изменения деформации со средним периодом ~ 9 мин. С течением времени за интервал в десятки минут сигнал либо исчезает, либо в некоторых пределах изменяется его форма.

Обсуждение результатов

В работе (Бордонский, Гурулев, 2019) приводятся данные о том, что в лабораторном эксперименте на частотах 13–14 ГГц наблюдалось сильное рассеяние излучения блоком изо льда при его нагревании (с флуктуациями фазы и амплитуды рассеянных волн). Полученные данные лабораторных и натурных измерений со спутника Sentinel-1В позволяют сделать вывод о возможности использования сантиметрового диапазона для наблюдений за неустойчивым состоянием ледяных покровов и ледников. На этом принципе основана методика раннего определения возможного схода ледников, описанная в работе (Гурулев и др., 2021).

На *рис. 5* представлена принципиальная схема обнаружения начального движения ледника. С помощью радиолокатора с синтезированной апертурой проводят мониторинг данного криосферного объекта. Затем при сравнении изменения во времени картин коэффициента обратного рассеяния выявляют области ледника, у которых этот коэффициент резко повысился за короткое время. Данное повышение и будет предвестником возможного схода ледника.

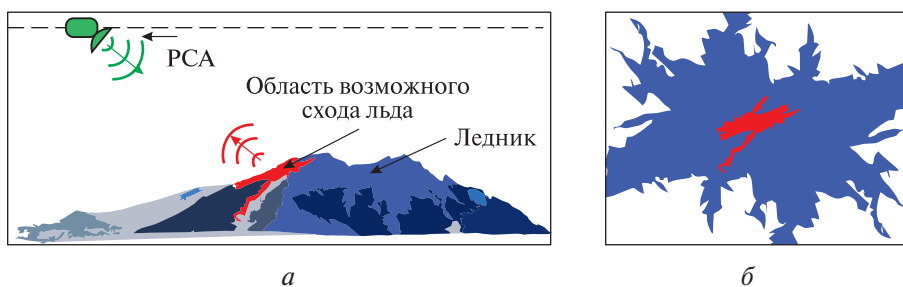


Рис. 5. Поиск областей возможного схода пульсирующего ледника: *а* — схема обнаружения возможного схода ледника; *б* — вид сверху. Выделен контрастный участок ледника с повышенным приращением значения коэффициента обратного рассеяния

Таким образом, с помощью спутниковой радиолокации можно будет обнаруживать области возможного схода пульсирующих ледников по проявлению автоволн пластического течения.

Кроме медленных волн течения можно регистрировать и быстрые проявления автоволн, например при прохождении уединённых волн, которые наблюдаются при разгрузке напряжений льда крупных пресных озёр, возникновение ударных нагрузок, воздействие сейсмических возмущений. Для этого необходима стационарная установка аппаратуры по схеме двухпозиционного активного зондирования. Наиболее чувствительной будет система на частотах, где длина волны излучения близка к параметру дифракционных решёток, создаваемых волнами течения. Следует отметить, что вопрос об оптимальных длине волны и поляризации требует дополнительного исследования для льдов различного генезиса, что определяется его структурой, а также видом и концентрацией примесей.

Применение представленной идеи возможно для регистрации сверхмедленных волновых движений в водоёме, покрытом пресным льдом, например приливных волн. В таком случае используется свойство сохранения текучести льда при любых значениях механических напряжений. Здесь также используется двухпозиционная схема измерений при просвечивании ледяного покрова внутри структуры параллельно поверхностям раздела. Для повышения чувствительности к слабым проявлениям пластичности в объекте требуется увеличить расстояние между излучателем и приёмником, а также оптимизировать параметры аппаратуры.

Что касается льдов с повышенным содержанием солей, то для них эффект образования автоволн течения не исследован. Механическая прочность такого льда ниже из-за наличия в нём жидких незамерзающих солевых включений, поэтому пластическое течение самих кристаллов льда при деформации ослаблено.

Предполагается, что автоволны пластического течения также могут быть зарегистрированы при микроволновых радиометрических измерениях. Из-за высокой пространственной изменчивости полей напряжения для радиометрических наблюдений требуется более высокое пространственное разрешение, чем имеющееся в настоящее время для спутниковых систем микроволновой радиометрии.

Выводы

1. Экспериментально доказано существование автоволн течения на начальной стадии пластической деформации льда. Чисто качественно их появление можно объяснить существованием в кристаллах льда отрицательной дифференциальной вязкости (т.е. падающего участка на зависимостях «деформация – напряжение»). Волны течения имеют длину порядка одного сантиметра и образуют в ледяных структурах хаотически расположенные дифракционные решётки, параметры которых изменяются во времени. Наиболее оптимальные частоты зондирования для регистрации автоволн течения во льду находятся в области 13–14 ГГц, но они могут быть обнаружены и при использовании более широкого частотного интервала от 5 до 30 ГГц. Из-за относительно высокой прозрачности пресного льда в микроволновом диапазоне данные частоты эффективны для разработки метода их обнаружения и определения динамики масс льда.

2. При проведении регулярных радарных измерений земной поверхности можно обнаружить предвестники разрушения ледяных структур, например разрушения плавающих льдин или схода ледников, по усилению рассеяния излучения.

3. Эффект возникновения рассеяния излучения экспериментально обнаружен для пресного льда. В случае морского льда данный эффект может наблюдаться, если во льду будут заморожены капсулы с растворами солей, так как солёный лёд более пластичен из-за влияния жидких включений. Это может быть при температурах ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Литература

1. Богородский В. В., Бенгли Ч., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 318 с.
2. Бордонский Г. С., Гурулев А. А. Проявление автоволн пластического течения в пресном льду при микроволновых измерениях // Письма в Журн. техн. физики. 2019. Т. 45. № 6. С. 40–42. DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47499.17645.
3. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Многочастотные микроволновые измерения распространения поляризованного излучения внутри ледяного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 275–280.
4. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 228–240.
5. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 150–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161.
6. Гурулев А. А., Бордонский Г. С., Орлов А. О. Способ определения начальной стадии деформации наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент РФ 2742051. Рег. 02.02.2021.
7. Долгушин Л. Д., Осипова Г. Б. Пульсирующие ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 192 с.
8. Зуев Л. Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. М.: Физматлит, 2018. 207 с.

9. Зуев Л. Б., Хон Ю. А. Пластическое течение как процесс формирования пространственно-временных структур. Ч. I. Качественные и количественные закономерности // Физ. мезомеханика. 2021. Т. 24. № 6. С. 5–14. DOI: 10.24412/1683-805X-2021-6-5-14.
10. Кокин О. В. Геолого-геоморфологическая деятельность пульсирующих ледников // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2011. № 1. С. 22–27.
11. Котляков В. М., Рототаева О. В., Десинов Л. В., Осокин Н. И. Причины и следствия катастрофического выброса пульсирующего ледника Колка в центральном Кавказе // Докл. Акад. наук. 2003. Т. 389. № 5. С. 688–692.
12. Котляков В. М., Десинов Л. В., Десинов С. Л., Рудаков В. А. Подвижки ледников Памира в 2020 году // Лёд и снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 471–480. DOI: 10.31857/S2076673421030102.
13. Мачерет Ю. Я., Глазовский А. Ф., Лаврентьев И. И., Марчук И. О. Распределение холодного и тёплого льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) по данным наземного радиозондирования // Лёд и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 149–166. DOI: 10.15356/20766734-2019-2-430.
14. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 150–169.
15. Lo Vecchio A., Lannutti E., Lenzano M., Mikkan R., Vacafior P., Lenzano L. MODIS Image-derived ice surface temperature assessment in the Southern Patagonian Icefield // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2019. V. 43. Iss. 6. P. 754–776. DOI: 10.1177/0309133319851022.
16. Shokr M., Sinha N. Sea Ice: Physics and Remote Sensing. USA: John Wiley and Sons; American Geophysical Union, 2015. 600 p. DOI: 10.1002/9781119028000.

Registration of plastic flow autowaves in ice structures in radar measurements

A. A. Gurulev, G. S. Bordonskiy, A. O. Orlov

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

The paper considers radar peculiarities of ice structures state during plastic deformation. The peculiarities are based on determining the increase in intensity of scattered microwave radiation in a selected spectral interval — at frequencies of 13–14 GHz. The effect is determined by the wavelength of plastic flow autowaves, with a characteristic value of the order of one centimeter. Autowaves form chaotically distributed sets of diffraction gratings in ice, which change in time under the action of mechanical stresses. During analysis of Sentinel-1B satellite radar images of ice cover of Lake Shakhshinskoe (Trans-Baikal Territory), one of them showed an increased value of the backscattering coefficient. The effect is associated with the manifestation of plastic flow autowaves during strong diurnal changes in the thermodynamic temperature of the ice cover. It is proposed to use the method of radar registration of current waves to detect a precursor of descent of pulsating glaciers in the form of increased scattered radiation from an object revealed in comparative measurements.

Keywords: microwaves, ice structures, plastic flow autowaves, ice fluidity, radar

Accepted: 27.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-222-229

References

1. Bogorodskii V. V., Bentli Ch., Gudmandsen P., *Radioglyatsiologiya* (Radioglaciology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 318 p. (in Russian).
2. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Plastic flow autowaves in freshwater ice as manifested by microwave reflection measurements, *Technical Physics Letters*, 2019, Vol. 45, No. 3, pp. 285–287, DOI: 10.1134/S1063785019030246.

3. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Multy-frequency polarization measurements of microwaves propagating into ice cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 275–280 (in Russian).
4. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Difference between radar and radiometric signatures (the case of eutrophic lake ice cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 228–240 (in Russian).
5. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Determination of bottom gas liberation zones in fresh ice water areas according to radar and radiometric measurements data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 150–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150–161.
6. Gurulev A. A., Bordonskii G. S., Orlov A. O., *Sposob opredeleniya nachal'noi stadii deformatsii nablyudаемого s kosmicheskogo apparata lednika* (Method for determining the initial stage of deformation of the glacier observed from the spacecraft), Patent RU 2742051, Reg. 02.02.2021 (in Russian).
7. Dolgushin L. D., Osipova G. B., *Pul'siruyushchie ledniki* (Pulsing glaciers), Leningrag: Gidrometeoizdat, 1982, 192 p. (in Russian).
8. Zuev L. B., *Avtovolnovaya plastichnost'. Lokalizatsiya i kollektivnye mody* (Autowave plasticity. Localization and collective mods), Moscow: Fizmatlit, 2018, 207 p. (in Russian).
9. Zuev L. B., Khon Yu. A., Plastic Flow as Spatiotemporal Structure Formation. Part I. Qualitative and Quantitative Patterns, *Physical Mesomechanics*, 2022, Vol. 25, Issue 2, pp. 103–110, DOI: 10.1134/S1029959922020011.
10. Kokin O. V., Geological and geomorphologic effects of surging glaciers, *Moscow University Vestnik. Ser. 5. Geography*, 2011, No. 1, pp. 22–27 (in Russian).
11. Kotlyakov V. M., Rototaeva O. V., Desinov L. V., Osokin N. I., Causes and consequences of the catastrophic advance of the Kolka surging glacier in the central Caucasus, *Doklady Earth Sciences*, 2003, Vol. 389, No. 3, pp. 447–451.
12. Kotlyakov V. M., Desinov L. V., Desinov S. L., Rudakov V. A., Surges of the Pamir glaciers in 2020, *Ice and Snow*, 2021, Vol. 61, No. 3, pp. 471–480 (in Russian), DOI: 10.31857/S2076673421030102.
13. Macheret Yu. Ya., Glazovsky A. F., Lavrentiev I. I., Marchuk I. O., Distribution of cold and temperate ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, from ground-based radio-echo sounding, *Ice and Snow*, 2019, Vol. 59, No. 2, pp. 149–166 (in Russian), DOI: 10.15356/20766734-2019-2-430.
14. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 150–169 (in Russian).
15. Lo Vecchio A., Lannutti E., Lenzano M., Mikkani R., Vacafior P., Lenzano L., MODIS Image-derived ice surface temperature assessment in the Southern Patagonian Icefield, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2019, Vol. 43, Issue 6, pp. 754–776, DOI: 10.1177/0309133319851022.
16. Shokr M., Sinha N., *Sea Ice: Physics and Remote Sensing*, USA: John Wiley and Sons; American Geophysical Union, 2015, 600 p., DOI: 10.1002/9781119028000.