Выявление областей торошения пресного ледяного покрова по собственному тепловому излучению

А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов, В.А. Казанцев, А.К. Козлов

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

Представлены результаты радиометрических измерений в микроволновом и тепловом инфракрасном (ИК) диапазонах участков торошения пресного ледяного покрова на примере Ивано-Арахлейских озёр, расположенных в Забайкальском крае. Показано, что в сантиметровом и ИК-диапазонах происходит увеличение мощности собственного теплового излучения льда в области, где наблюдаются ледяные торосы. В то же время в миллиметровом диапазоне она понижается, как показывают измерения на длине волны 8,8 мм. Этот факт можно объяснить наличием трещин в области торошения ледяного покрова, через которые происходит выход влаги и передача теплоты, приводящие к повышению температуры верхних слоёв и образованию кристаллов сублимационного льда. Они соизмеримы с длиной волны миллиметрового диапазона, что и приводит к увеличению рассеяния излучения, а соответственно, и к уменьшению радиояркостной температуры в этом диапазоне. По космическим снимкам с Landsat-8 в 10-м и 11-м каналах также отмечается увеличение яркостной температуры в местах торошения ледяного покрова Ивано-Арахлейских озёр, однако такой эффект не наблюдается на оз. Байкал. Наоборот, в последнем случае происходит незначительное уменьшение температуры в области торосов. Этот эффект нами объясняется ветровым воздействием на пресный ледяной покров, который охлаждает исследуемый объект.

Ключевые слова: микроволновый диапазон, торосы, пресный ледяной покров, радиометрия, Landsat-8, ИК-диапазон

Одобрена к печати: 09.01.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-219-228

Введение

Известно, что ледяной покров пресных озёр и водохранилищ — чувствительный индикатор состояния окружающей среды (Бордонский, 1990; Пехович, 1983). Измеряя его электромагнитные характеристики дистанционными радиофизическими методами, можно определить параметры водоёмов: минерализацию вод, концентрацию планктонных организмов, характеристики донного газоотделения, наличие источников притока и стока вод и ряд других. В последние годы были предложены новые методики спутниковых радиометрических микроволновых измерений ледяных покровов северных рек, позволяющие даже при одноканальных измерения определять динамику пресных вод их стока и взаимодействия с природной средой (Тихонов и др., 2020; Tikhonov et al., 2018). Особенности этих методик заключаются в эффективном использовании априорной информации об электрофизических характеристиках льда и усреднении излучательных характеристик покровов на больших площадях (в сотни квадратных километров).

Хотя микроволновые радиометрические измерения показали свою эффективность при изучении пресных ледяных покровов, низкое пространственное разрешение спутниковых систем сдерживает их практическое использование. Поэтому для выяснения возможностей радиометрии с высоким разрешением было начато использование приземных носителей — дельталетов и судов на воздушной подушке, что было продемонстрировано при исследованиях на оз. Байкал (Бордонский и др., 2015).

Высокое пространственное разрешение позволяет изучать особые структуры ледяных покровов, например кольцевые образования, становые трещины и торосы. Их обнаружение и определение структурных особенностей в пресном льду может дать принципиально новую

гидрологическую информацию о водоёмах. Например, было установлено, что становые трещины и связанные с ними торосы на оз. Байкал выявляют структуру подлёдных течений, возникающих под действием сейшовых колебаний (Бордонский, 2007). Можно отметить, что расположение становых трещин для оз. Байкал представлено в работе (Сокольников, 1960). Известны и расположения крупномасштабных вихрей при действии одноузловой сейши (Судольский, 1991). Однако в настоящее время отсутствуют исследования электромагнитных характеристик торосов и других относительно небольших структурных образований в пресноводных ледяных покровах и их связей с характеристиками водных объектов, в том числе атмосферными процессами, геологическими структурами, сейсмическими явлениями, подлёдными течениями и другими локальными особенностями окружающей среды.

Цель работы — выполнить измерения радиояркостной температуры торосов пресного озера в сравнении с ненарушенным ледяным покровом с высоким разрешением в тепловом инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах для развития методик дистанционного зондирования гидрологических объектов.

Описание объекта и постановка проблемы

Торошение ледяного покрова бывает двух типов. Первый тип — это взлом, который происходит в результате деструкции ледяного покрова с образованием трещины в результате температурного или ветрового воздействия на ледяной покров. Второй тип торошения — это раздробление ледяного покрова на более мелкие куски (Тышко, 2009). Схема второй формы тороса приведена на *рис. 1*. Такие торосы образуются в основном на солёном льду. Для пресного ледяного покрова характерны торосы без киля, но в некоторых случаях могут быть и с ним. Объединяет эти два типа наличие паруса. Как видно из схемы приведённого тороса, толщина киля тороса может достигать десятка метров (Андреев, 2020), при этом его парус в среднем составляет всего около трёх метров. Этот факт позволяет выявлять области торошения ледяного покрова по радиолокационным изображениям (Заболотских и др., 2020), а также в видимом диапазоне (Duncan et al., 2018).



Рис. 1. Модель среднестатистического морского однолетнего тороса (Альхименко, Ксенофонтова, 2016): 1 — ледовое поле; 2 — парус тороса; 3 — ледяные блоки; 4 — киль (осадка) тороса (все размеры в метрах)

На пресном ледяном покрове внутренних водоёмов, как правило, образуются преимущественно торосы первой формы. Так, при исследовании торосов на оз. Байкал показано, что причиной образования представляется ветровое и термическое воздействие на пресный ледяной покров (Дунаев и др., 2018). Примером таких водоёмов могут служить Ивано-Арахлейские озёра, расположенные в Забайкальском крае. Ввиду того, что они имеют трещиноватость и неоднородность своих физических параметров, эти объекты хорошо видны с космических аппаратов высокого разрешения. При использовании зондирования в видимом диапазоне из космоса в зимний период торосы не наблюдаются. Это происходит из-за наличия снежного покрова (его толщина в Забайкалье не превышает, как правило, 20 см), что показано на *рис. 2a* на примере оз. Шакшинское. Однако если использовать более длинноволновые каналы, то торосы на космических снимках начинают проявляться. Например, они видны в тепловом инфракрасном диапазоне (*рис. 26*). Температура области торошения имеет некоторое повышенное значение на длинах волн 10,6–11,2 мкм, что соответствует 10-му каналу спутника Landsat-8. Также они проявляются на радиолокационных снимках сантиметрового диапазона, полученных с использованием систем с синтезированной апертурой, например со спутника Sentinel-1В.



Рис. 2. Космические снимки оз. Шакшинское, спутник Landsat-8: *а* — видимый диапазон; *б* — инфракрасный диапазон, 10-й канал (10,6—11,2 мкм). Дата: 12 февраля 2020 г.

Как известно, формирование излучения в инфракрасном диапазоне происходит с небольших глубин и для ледяного покрова составляет около десяти микрометров (Госсорг, 1988). В связи с чем возникает вопрос, какова причина, по которой некоторые участки тороса на космоснимках в тепловом инфракрасном диапазоне имеют повышенное значение температуры, приращение которой достигает несколько градусов Кельвина.

Методика исследований

Для решения поставленного вопроса нами были выполнены натурные прямые исследования областей торошения ледяного покрова озёр Арахлей и Шакшинское, расположенных в Забайкальском крае. Измерения выполнялись в 2020–2021 и 2021–2022 гг. в зимний период. Минерализация данных водоёмов составляет около 150 мг/л (Борзенко и др., 2021). По площади они почти равны — 58,5 и 52,5 км², однако оз. Арахлей значительно глубже оз. Шакшинского (максимальное значение глубины — 20 и 8 м соответственно).

Суть экспериментальных исследований состояла в измерении теплового излучения ледяного покрова на длинах волн 2,3; 0,88 см и в тепловом ИК-диапазоне (8–14 мкм). На автомобиль ВАЗ-2121 «Нива» устанавливались радиометрические приёмники на соответствующие длины волн под углом наблюдения 45°. Фотография установки приведена на *рис. За* (см. с. 222). Приём теплового излучения в микроволновом диапазоне осуществлялся на вертикальной поляризации. Калибровка радиометров выполнялась по отражённому от металлической поверхности излучению неба и по собственному излучению невзволнованной пресной воды в проруби, имеющей те же геометрические размеры, что и металлический лист. Запись выходных сигналов с радиометров и показаний с навигационного оборудования осуществлялась через систему сбора данных фирмы Agilent на персональный компьютер.



Рис. 3. Фото автомобиля с радиометрическим комплексом (a); торос на оз. Шакшинское (б)

При измерениях были выполнены трассовые записи радиояркостной температуры (T_g) , которая характеризует мощность радиотеплового излучения и радиационной температуры (T_p) в тепловом ИК-диапазоне, характеризующей интегральную мощность излучения в некоторой полосе частот ледяного покрова. Трассы были выбраны через торосы, которые выделялись на космических снимках, полученных с Landsat-8 в 10-м и 11-м каналах, по увеличенному значению мощности излучения. Исследуемые торосы на данных водоёмах не превышают в вертикальной плоскости высоты одного метра. На *рис. Зб* показан пример такого образования.

По трассовой записи теплового излучения пресного ледяного покрова определялись особые точки, в которых отбирались пробы льда для выяснения причины повышенного значения мощности собственного излучения в районе торошения ледяного покрова.

Полученные результаты и их обсуждение

Полученные результаты представлены на *puc.* 4 и 5 (см. с. 223). Как правило, при пересечении автомобилем с радиометрами тороса фиксируется изменение значений радиояркостной и радиационной температуры. Причём в тепловом ИК-канале часто наблюдается повышеное значение мощности теплового излучения на 1-2 К (см. *puc.* 5). Однако в некоторые дни такого приращения над средним значением яркостной температуры ледяного покрова не наблюдается (см. *puc.* 4), что связано с внешним воздействием на верхние тонкие слои снежного покрова (ветер), в результате чего торошение льда в ИК-диапазоне не фиксируется.

На длине волны 2,3 см практически всегда в области тороса наблюдается повышенная радиояркостная температура, достигающая приращения 20 К от её среднего значения по акватории ледяного покрова водоёма в данном диапазоне. В момент начала деструкции ледяного покрова эта величина достигает максимального значения, что говорит об активном разрушении объекта в области его торошения.

Аномальным оказалось поведение радиояркостной температуры ледяного покрова в области торосов в миллиметровом диапазоне: $T_{\rm g}$ было ниже среднего на ~20 К. Причём величина приращения радиояркостной температуры не зависела от времени существования торосов: в конце зимы или в начале весны (и в феврале, и в марте). Для выяснения причины данного феномена нами были исследованы области торошения ледяного покрова на оз. Шакшинское.

На глубину 40 см была проделана траншея длинной 3 м и шириной 40 см. Фотография данного разреза приведена на *рис. 6* (см. с. 223). Видно, что верхняя часть тороса имеет белый цвет в результате рассеяния дневного света. Причём в трещине был обнаружен субли-

мационный лёд (Войтковский, 1999) в виде кристаллической изморози, имеющей кристаллы размером 3—8 мм, что соизмеримо с длиной волны 0,88 см. Снимок этого образования приведён на *рис.* 7 (см. с. 224). Вероятно, при термических нагрузках на ледяной покров водоёма (его сжатии или расширении) происходит разгрузка напряжений в области его торошения. В результате чего трещины в торосах начинают изменять свои размеры. В микротрещины попадает водяной пар из более тёплой атмосферы, который и кристаллизуется в трещинах ледяного покрова.



Рис. 4. Трассовая запись *T*_я и *T*_р при пересечении тороса на оз. Арахлей. Длины волн: ИК (тепловой диапазон), 8,8 мм и 2,3 см. Стрелкой отмечено место торошения льда. Дата: 5 февраля 2021 г.



Рис. 5. Трассовая запись *T*_я и *T*_р пересечения тороса на оз. Арахлей. Длины волн: ИК, 8,8 мм и 2,3 см. Стрелкой отмечено место торошения льда. Дата: 11 марта 2021 г.



Рис. 6. Фото стенки траншеи в месте тороса, оз. Шакшинское



Рис. 7. Фото сублимационного льда

Наличие сублимационного льда с характерными размерами кристаллов, заполняющего трещины, приводит к увеличению рассеяния и понижению радиометрического сигнала в области торошения ледяного покрова на длине волны 0,88 см.

При изучении областей торошения ледяного покрова на оз. Байкал по космическим снимкам в инфракрасном диапазоне, полученным с Landsat-8 в разные периоды времени, показано отсутствие повышенных значений яркостной температуры в данной области, причём в видимом диапазоне они наблюдаются (*puc. 8*). Так, для примера приведена фотография одного из торосов на оз. Байкал вблизи м. Бурхан (*puc. 9*, см. с. 225). Данный торос имеет парус порядка одного метра. Также, как видно из фотографии, в области тороса отсутствует снежный покров. Этот факт говорит о наличии большой ветровой нагрузки на данном участке. Действительно, скорость ветра на метеостанции Хужир (о. Ольхон), расположенной недалеко от места нахождения тороса, в 2022 г. во время существования ледяного покрова (январь – апрель) имела среднее значение около 3 м/с, причём в некоторые дни она достигала 17 м/с.



Рис. 8. Снимок тороса (1) на оз. Байкал в районе м. Бурхан с космического аппарата Landsat-8: *a* — видимый диапазон; *б* — 10-й канал. Дата: 21 февраля 2019 г.



Рис. 9. Мыс Бурхан (Скала Шаманка), о. Ольхон, Прибайкальский национальный парк, пос. Хужир, Ольхонский р-н, Иркутская обл. Дата: 22 февраля 2019 г. Источник: https://ru.wikivoyage.org/wiki/ Файл:Торосы_зимнего_Байкала.jpg

Так как слой, формирующий излучение в инфракрасной области, порядка 10 мкм, то в результате ветрового охлаждения происходит выравнивание температуры по акватории снежно-ледяного покрова. По этой причине обнаружить в тепловом ИК-диапазоне области торошения льда при постоянном ветровом воздействии невозможно.

Выводы

- Выполненные измерения показали, что и яркостная, и радиационная температура торосов пресного ледяного покрова в сантиметровом и инфракрасном диапазонах обладает изменчивостью и склонностью к возрастанию, в то время как радиояркостная температура в миллиметровом диапазоне понижена по сравнению с фоновыми значениями ненарушенных областей льда. Это определяется особенностями структуры: проникновением воды в нижнюю часть ледяного покрова, рассеянием излучения и таянием льда, а также влиянием атмосферы.
- 2. По характеру приращения температуры излучения можно сделать выводы о состоянии тороса и истории ледяного покрова, а также гидрологических особенностях. Сравнение знаков приращения яркости и её средних значений на трёх использованных длинах волн позволяет определить стадию развития торосов. По радиационной температуре в тепловом ИК-диапазоне можно определять появление увлажнения верхних слоёв и движение воздушных масс вблизи поверхности ледяного покрова. Стабильным признаком тороса оказалось отрицательное приращение радиояркостной температуры в миллиметровом диапазоне, определяемое сублимационным льдом в трещинах тороса. Сантиметровый диапазон более чувствителен к таянию глубоких

слоёв тороса. При начале таяния возникает возрастание радиояркостной температуры из-за увеличения фактора потерь области льда, формирующей излучение.

- 3. Таким образом, использование инфракрасного и микроволнового диапазонов (в сантиметровом и миллиметровом участке спектра) позволяет исследовать стадии развития торосов и характеристики ледяного покрова. Эти диапазоны эффективно дополняют друг друга в случае отсутствия заметного влияния облачных образований.
- 4. Высокое пространственное разрешение, необходимое для исследования торошения льда, может быть достигнуто при установке аппаратуры на приземные носители (беспилотные летательные аппараты, дельталеты, суда на воздушной подушке). Комплексирование с радарными методами измерений, используемыми при исследовании ледяных покровов (Заболотских и др., 2020; Чимитдоржиев и др., 2013), также представляется перспективным для изучения водных объектов по структурным образованиям ледяных покровов.

Литература

- 1. *Альхименко А. И., Ксенофонтова Д.А.* Определение основных расчетных параметров тороса при помощи численного моделирования с целью уточнения ледовой нагрузки на ГТС // Полярная механика. 2016. № 3. С. 21–30.
- 2. *Андреев О. М.* Учёт внутренней структуры киля тороса при термодинамических расчётах эволюции консолидированного слоя // Лёд и снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 547–556. DOI: 10.31857/ S2076673420040059.
- 3. *Бордонский Г.С.* Тепловое излучение ледяного покрова пресных водоёмов. Новосибирск: Наука, 1990. 102 с.
- 4. *Бордонский Г.С.* Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–76.
- 5. *Бордонский Г. С., Гурулев А.А., Орлов А. О., Лукьянов П. Ю., Цыренжапов С. В.* Приземные микроволновые радиометрические измерения ледяного покрова оз. Байкал // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 91–99.
- 6. Борзенко С. В., Фёдоров И.А., Комогорцева И.А. Гидрохимия Ивано-Арахлейских озер в разные климатические фазы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 439–450. DOI: 10.31857/ S0321059621040039.
- 7. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.
- 8. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. Н.В. Васильченко / под. ред. Л. Н. Курбатова. М.: Мир, 1988. 420 с.
- 9. Дунаев И. И., Золотов Д.А., Шурашов А.Д., Горшков А.С., Никандров И.С. Структура и свойства торосов на ледовом покрове рек и озер // Norwegian J. Development of the International Science. 2018. № 18-1. С. 46–50.
- 10. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Балашова Е. А., Костылев А. И., Кудрявцев В. Н. О возможности идентификации крупномасштабных областей всторошенного льда в Арктике по данным скаттерометра ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
- 11. Пехович А. И. Основы гидроледотермики. Л.: Энергоатомиздат: Ленинградское отд-ние, 1983. 200 с.
- 12. Сокольников В. М. Вертикальные и горизонтальные смещения и деформации сплошного ледяного покрова Байкала // Исслед. гидрологического режима Байкала: Тр. Байкальской лимнологической станции. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 18. С. 291–350.
- 13. Судольский А. С. Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 261 с.
- 14. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю., Синицкий А. И. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период ледостава // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59–76. DOI: 10.31857/S0205961420030070.
- 15. *Тышко К. П.* Формирование и консолидация торосов в однолетнем ледяном покрове арктических морей как результат лабораторных и натурных исследований // Метеорология и гидрология. 2009. № 8. С. 71–79.
- 16. Чимитдоржиев Т. Н., Татьков Г. И., Тубанов Ц. А., Дагуров П. Н., Захаров А. И., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В., Быков М. Е. Исследования динамики ледового покрова озера Байкал по радарным данным и методами GPS-навигации // Вестн. Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2013. № 5(51). С. 76–79.

- Duncan K., Farrell S. L., Connor L. N., Richter-Menge J., Hutchings J. K., Dominguez R. High-resolution airborne observations of sea-ice pressure ridge sail height // Annals of Glaciology. 2018. V. 59. Iss. 76pt2. P. 137–147. DOI: 10.1017/aog.2018.2.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // The Cryosphere. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. DOI: 10.5194/ tc-12-2727-2018.

Identification of areas of hummocking of freshwater ice cover by its own thermal radiation

A. A. Gurulev, A. O. Orlov, S. V. Tsyrenzhapov, V. A. Kazantsev, A. K. Kozlov

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

The paper presents the results of radiometric measurements in the microwave and infrared (IR) ranges in areas of freshwater ice hummocking, using the example of the Ivano-Arakhlei lakes located in the Trans-Baikal Territory. It is shown that in the centimeter and IR ranges there is an increase in the power of the ice own thermal radiation in the area where ice hummocks are observed. At the same time, it decreases in the millimeter range, as measurements at a wavelength of 8.8 mm show. This fact can be explained by the presence of cracks in the area of hummocking of the ice cover, through which moisture escapes and heat is transferred, leading to an increase in the temperature of the upper layers and the formation of sublimation ice crystals. They are commensurate with the wavelength of the millimeter range, which leads to an increase in the scattering of radiation, and, accordingly, to a decrease in the brightness temperature in this range. According to satellite images from Landsat-8 bands 10 and 11, an increase in brightness temperature is also observed on Lake Baikal. On the contrary, in the latter case, there is an insignificant decrease in the temperature value in the region of hummocks. We explain this effect by the presence of wind action on the freshwater ice cover, which cools the object under study.

Keywords: microwave range, hummocks, freshwater ice cover, radiometry, Landsat-8, IR range

Accepted: 09.01.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-219-228

References

- 1. Alkhimenko A. I., Ksenofontova D. A., Determination of major design parameters of an ice ridge using numerical simulation in view of adjustment of ice loads on the hydraulic engineering structures, *Polyarnaya mekhanika*, 2016, No. 3, pp. 21–30 (in Russian).
- Andreev O. M., Accounting of the internal structure of the ice hummock keel in thermodynamic calculations of the evolution of the consolidated layer, *Ice and Snow*, 2020, Vol. 60, No. 4, pp. 547–556 (in Russian), DOI: 10.31857/S2076673420040059.
- 3. Bordonskiy G.S., *Teplovoe izluchenie ledyanogo pokrova presnykh vodoemov* (Thermal radiation of ice cover of freshwater bodies), Novosibirsk: Nauka, 1990, 102 p. (in Russian).
- 4. Bordonsky G.S., The causes of permanent cracks in ice covers of lakes, *Geography and Natural Resources*, 2007, No. 2, pp. 69–76 (in Russian).
- 5. Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Lukyanov P.Yu., Tsyrenzhapov S.V., Surface microwave radiometric measurements of Lake Baikal ice cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 91–99 (in Russian).
- Borzenko S. V., Fedorov I. A., Komogortseva I. A., Hydrochemistry of the Ivano-Arakhleiskie lakes in different climate phases, *Water Resources*, 2021, Vol. 48, No. 4, pp. 439–450 (in Russian), DOI: 10.31857/S0321059621040039.

- 7. Voitkovskii K.F., *Osnovy glyatsiologii* (Fundamentals of glaciology), Moscow: Nauka, 1999, 255 p. (in Russian).
- 8. Gaossorgues G., *La Thermographie Infrarouge: Principes-Technologie-Applications*, Paris: Lavoisier, 1984, 481 p.
- 9. Dunaev I. I., Zolotov D. A., Shurashov A. D., Gorshkov A. S., Nikandrov I. S. Structure and property hummock on the ice river and lake, *Norwegian J. Development of the International Science*, 2018, No. 18-1, pp. 46–50 (in Russian).
- Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Balashova E. A., Kostylev A. I., Kudryavtsev V. N., Identification of large-scale sea ice ridge areas in the Arctic using ASCAT data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 165–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
- 11. Pekhovich A. I., *Osnovy gidroledotermiki* (Fundamentals of hydro-ice thermals), Leningrad: Energoatomizdat: Leningradskoe otdelenie, 1983, 200 p. (in Russian).
- Sokolnikov V. M., Vertical and horizontal displacements and deformations of the continuous ice cover of Baikal, *Issledovaniya gidrologicheskogo rezhima Baikala: Trudy Baikal'skoi limnologicheskoi stantsii*, Moscow: Leningrad: Izd. AN SSSR, 1960, Vol. 18, pp. 291–350 (in Russian).
- 13. Sudolsky A.S., *Dinamicheskie yavleniya v vodoemakh* (Dynamic events in water bodies), Leningrag: Gidrometeoizdat, 1991, 261 p. (in Russian).
- 14. Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., Sinitskii A.I., L-Band Radiative Features of the Ob Bay in the Freeze-Up Period, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 3, pp. 59–76 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420030070.
- 15. Tyshko K. P., Formation and consolidation of hummocks on the Arctic seas' one-year ice cover as a result of laboratory and field researches, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, No. 8, pp. 71–79 (in Russian).
- Chimitdorzhiev T. N., Tatkov G. I., Tubanov Zh.A., Dagurov P. N., Zakharov A. I., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Bykov M. E., Research of Lake Baikal ice cover dynamics on the basis of radar data and GPS-navigation methods, *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva*, 2013, No. 5(51), pp. 76–79 (in Russian).
- Duncan K., Farrell S. L., Connor L. N., Richter-Menge J., Hutchings J. K., Dominguez R., High-resolution airborne observations of sea-ice pressure ridge sail height, *Annals of Glaciology*, 2018, Vol. 59, No. 76pt2, pp. 137–147, DOI: 10.1017/aog.2018.2.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E., Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data, *The Cryosphere*, 2018, Vol. 12, No. 8, pp. 2727–2740, DOI: 10.5194/tc-12-2727-2018.