

Особенности структуры пропарины в ледяном покрове, образованной выходами газа

© 2018 г. Г.С. Бордонский*, С.Д. Крылов, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов

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

*lgc255@mail.ru

Characteristics of opening in the ice cover formed by the gas vents

G.S. Bordonskiy*, S.D. Krylov, A.A. Gurulev, A.O. Orlov, S.V. Tsyrenzhapov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Chita, Russia

*lgc255@mail.ru

Received January 22, 2018

Accepted May 5, 2018

Keywords: *channel in ice, gas venting, ice cover, ice dome, ice steamthrough, microwave radiometry.***Summary**

«*Proparina*» (russ) is a small hole in the ice cover formed by steaming of the ice by the gas vents. Some characteristics of this phenomenon were studied by the example of formation of one *proparina* found in March 2015 in the ice cover of the shallow eutrophic Lake Shakshinskoye (Trans-Baikal Region). The interest in this object is due to the fact that a *proparina*, unlike a *polynya* (small water opening in ice), is formed after the establishment of the ice cover and it can appear in those parts of a reservoir where there is no clearly expressed inflow or outflow of water. Although *proparinas* do often occur on some water bodies, e.g. Lake Baikal, a detailed description of their structure and process of formation is not available. Research on features of the *proparina* in the ice of the Lake Shakshinskoye and adjacent areas of this reservoir was carried out on March 25 and 28 in 2015. Melting at the lower and upper ice cover boundaries started at that time, and it was found that the *proparina* under investigation was formed in the center of a dome-shaped area where the ice thickness decreased compared to the adjoining parts within a distance of 200 meters. Gradient of the lower surface in the dome was on average 5 centimeters per 100 meters at a distance from the center. We found a narrow channel in the ice through which gas came into the *proparina* in the form of separate portions. The maximum recorded volume of gas that came into the open *proparina* reached 10 l/min. The channel is supposed to be formed at the end of winter period due to the release of gas during the melting of the lower layers of the ice cover and the subsequent movement of gas bubbles into the center of the dome. To study the ice cover structure, we measured thermo-microwave self-radiation of the “ice-water” system in the centimeter range. Such measurements allow detecting changes in ice thickness with an accuracy of 1 cm. It is assumed that the accumulation of gases under the ice causes the instability of the water column due to warming by the heat flow from the bottom layers and initiates the circulation and, thus, formation of *proparina*.

Citation: Bordonskiy G.S., Krylov S.D., Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Characteristics of opening in the ice cover formed by the gas vents. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (3): 405–416. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-405-416.

Поступила 22 января 2018 г.

Принята к печати 5 мая 2018 г.

Ключевые слова: *газоотделение, каналы во льду, ледяной купол, ледяной покров, микроволновая радиометрия, пропарина.*

В ледяном покрове пресного озера Шакшинское (Забайкальский край) изучена пропарина, которая образуется после установления ледяного покрова и появляется в тех частях водоёма, где отсутствуют выраженные приток и сток вод. Пропарина размером 2 × 3 м² сформировалась в вершине ледяного купола диаметром около 400 м. Обнаружен узкий канал, по которому в пропарину поступал газ, выделяющийся при таянии нижних слоёв ледяного покрова. Предполагается, что локальное накопление газов нарушает устойчивость столба воды из-за его разогрева потоком тепла из донных слоёв, приводит к возникновению циркуляции и образованию пропарины.

Введение

Ледяные покровы водоёмов в зимний период подвергаются метаморфизму с формированием различных структур. Некоторые из них образуются приблизительно на одних и тех же участ-

ках ледяного покрова, отражая геологические и гидрологические особенности водоёма [1–3]. Например, в ледяном покрове оз. Байкал возникают локализованные структуры – пропарины, представляющие собой области размером от метра до сотен метров, где ледяной покров от-

существует или имеет незначительную толщину по сравнению с окружающими областями [1]. Пропарину отличают от полыньи тем [4], что она образуется после установления ледяного покрова. Многочисленные наблюдения показывают, что пропарины связаны с донным газоотделением или возникают под действием течений [1, 3], однако детальное описание механизма образования пропарин и их структуры отсутствует. Процесс образования пропарин и особенности их строения интересны для понимания структурообразования в криосфере (например, такие объекты есть в Арктике [5]), а также в связи с их опасностью для транспортных средств при передвижении по льду в зимнее время. Поскольку пропарины во многих случаях приручены к участкам донного газоотделения, то по их появлению можно судить о наличии донных органических отложений, газифицирующих месторождений и деструкции газогидратов [3].

Информация о структуре и параметрах пропарин в литературе ограничена. Наиболее характерные черты пропарины — её небольшие размеры $\sim 1 \div 100$ м, а также отсутствие в водоёме, вблизи их появления, выраженных течений. Детального описания механизма образования пропарин и их структуры нет. Возможно, это связано с тем, что, несмотря на кажущуюся простоту объекта, они образуются в сложной системе атмосфера — снежно-ледяной покров — водная среда. Эта система характеризуется нелинейными свойствами из-за фазового превращения воды при разрушении ледяного покрова, зависимости плотности воды от температуры и особых свойств переохлаждённой воды в интервале от 0 до -45 °C [5, 6]. Яркий пример необычных свойств слоистых структур — так называемая «отрицательная теплоёмкость», когда в воде, стратифицированной с глубиной по двум параметрам (например, температуре и плотности), может возникать нагрев некоторой области столба при оттоке тепла или, наоборот, охлаждение слоёв при притоке в них тепла [7]. Известны и другие объекты с аномальным поведением, например, «солевой осциллятор» в морском льду, в котором возникают медленные периодические вертикальные движения воды в капиллярах [8]. Поэтому можно ожидать появления структурных особенностей в ледяных покровах различного типа водоёмов в условиях выраженных изменений тепловых потоков через них, например,

для озёр в малоснежных районах с резко континентальным климатом.

Весной 2015 г. в середине марта поступило сообщение об обнаружении во льду оз. Шакшинское (группа Ивано-Арахлейских озёр Забайкальского края) образования, похожего на пропарину. При его вскрытии наблюдали резкий выброс газа, напоминающий взрыв. 25 марта 2015 г. на указанное место прибыла группа специалистов Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (ИПРЭК СО РАН). Обнаруженный необычный участок ледяного покрова имел толщину 20–30 см, его размеры составляли около 2×3 м². На удалении 0,5 м от границ образования толщина льда была приблизительно 90 см, что близко к среднему значению по акватории озера. По всем признакам была обнаружена пропарина, на что указывали небольшая толщина льда, локализация объекта в виде колодца с крутыми стенками, заметное выделение газа.

Задача настоящей работы — изучение особенностей ледяного покрова в области пропарины, образованной выходами газов. Необходимо было найти такие структурные особенности в области пропарины, которые помогли бы объяснить возникновение особых гидродинамических структур, способных вызвать локальное таяние льда.

Объект исследования

В отличие от оз. Байкал пропарина на оз. Шакшинское образовалась в мелководном озере, и можно ожидать, что связана она с особенностями метаморфизма ледяного покрова. Фотография обнаруженной пропарины дана на рис. 1. Ранее за время научных наблюдений за группой Ивано-Арахлейских озёр в течение 50 лет подобного объекта не наблюдали, но были отдельные сообщения о выбросах газа при вскрытии ледяного покрова. Данный район — достаточно населённый, на берегу озера находится с. Беклемишево, поэтому обнаруженная пропарина в данном водоёме, по-видимому, редкое явление. Оз. Шакшинское расположено в 51 км от г. Чита, на отрогах Яблонового хребта, на высоте 964 м над ур. моря. Оно неглубокое, эвтрофированное, имеет размеры до 10 км, вода пресная



Рис. 1. Фотография пропарины, 28 марта 2015 г.
Fig. 1. Photo of the ice streamthrough, 28.03.2015

гидрокарбонатная натриево-кальциевая с минерализацией 120–150 мг/л. В условиях резко континентального климата и безоблачной атмосферы зимние температуры воздуха в данном районе опускаются до -45°C с сильными суточными колебаниями, достигающими 30°C . Становление льда происходит в конце октября – начале ноября. Верховая вода, т.е. начало таяния верхних слоёв, наблюдается в начале апреля.

Зима 2014/15 г., возможно, была самой тёплой за последние десятилетия с незначительными осадками. Более 50% поверхности льда в конце зимнего периода было оголено, что позволило наблюдать особенности структуры ледяного покрова перед его таянием. Толщина льда в конце марта 2015 г. составляла 90–100 см, в то время как 30 лет назад, по измерениям авторов, толщина была 170–190 см при снежном покрове 10–20 см. В 2017/18 г. толщина ледяного покрова в этом же месяце составила 130 см.

Особенность оз. Шакшинское и его ледяного покрова заключается в заметном донном отделении газов за счёт деструкции донных органических отложений и их накоплении во льду [9]. Данная особенность исследовалась авторами ранее для разработки методики дистанционного определения газифицирующих объектов, выходящих под дно водоёмов, покрытых пресным неподвижным льдом. С этой целью в конце 1980-х

годов были выполнены, одни из первых в мировой практике, измерения собственного радиотеплового излучения ледяного покрова с борта самолёта ИЛ-14 с радиометром двухсантиметрового диапазона. Показано, что скопление мелких газовых пузырьков на нижней границе покрова можно обнаружить по приращению радиояркостной температуры. Радиоизображение ледяного покрова при длине волны 2,3 см, полученное в декабре 1989 г., приведено на рис. 2, а, а на рис. 2, б дана батиметрическая карта озера. На карте радиояркостной температуры выделяются области её повышенных значений, которым соответствовали участки с захваченными льдом газовыми пузырями. Видны также многочисленные участки льда, неоднородные по структуре. Полученная информация оказалась полезной для выяснения возможной причины появления пропарины (отмечена на рис. 2, а белым крестом). Эти данные соответствовали представлениям о причине появления такой структуры, определяемой накоплением в ледяном покрове газовых включений. Позже газовые включения исследовали и спутниковым радарным методом, и приземными радиометрическими измерениями [10], в процессе которых было рекомендовано, наряду с космическими радиолокаторами с разрешением 1–10 м, использовать радиометрические системы, устанавливаемые

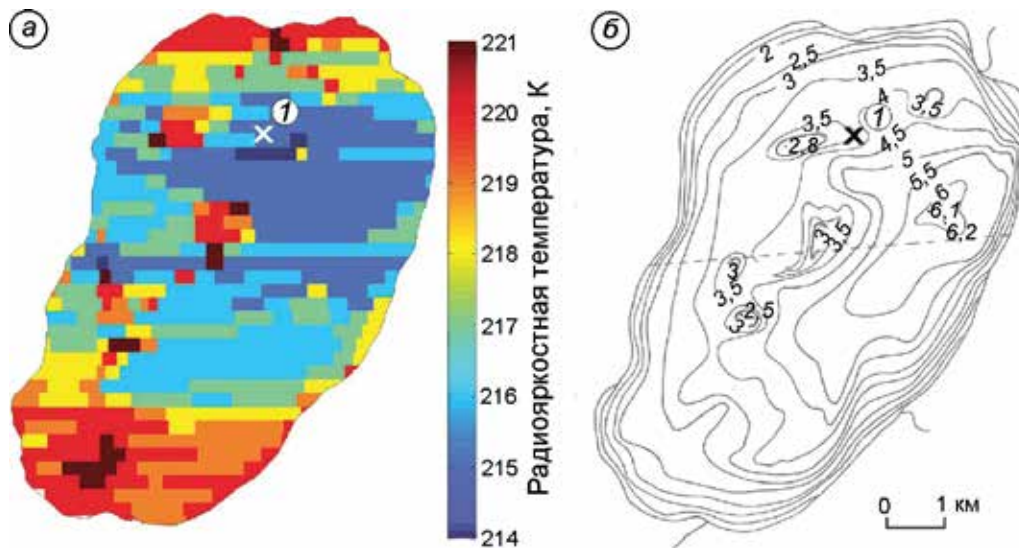


Рис. 2. Радиоизображение ледяного покрова оз. Шакшинское в условных цветах по микроволновым радиометрическим измерениям радиояркостной температуры при длине волны 2,3 см с борта самолёта АН-2 в декабре 1989 г. (а, 1 – область пропарины, обнаруженной в марте 2015 г.) и батиметрическая карта озера (б)
Fig. 2. The radio image of the ice cover of the Lake Shakshinskoe in conditional colors by microwave radiometer brightness temperature measurements at 2.3 cm wavelength from the aircraft AN-2 in December 1989. (а, 1 – the ice streamthrough region discovered in March 2015) and bathymetric map of the Lake Shakshinskoe (б)

на низколетящие носители для достижения пространственного разрешения около 1 м.

Методика исследований

Методика исследований предусматривала использование методов прямого измерения параметров объекта (толщина льда, глубина озера, температура воды, сбор и анализ газа, поступающего в пропарину), а также бесконтактного метода микроволновой радиометрии, позволяющего измерить ряд параметров льда, в том числе его толщину [11].

Толщину льда определяли при бурении покрова и последующего прямого измерения с точностью около 1 см. Температура до глубины 1,2 м измерялась переносным термометром ГТН175/МОР. Для больших глубин использовался откалиброванный терморезистор. Погрешность измерений – 0,1 °С. Сбор газов вели в пластиковые ёмкости, предварительно заполненные водой озера, с последующим её вытеснением газом при помещении сосуда в канал с движущимся газом. Из-за бурного выделения газа эта операция происходила очень быстро. Газы анализировали в химико-аналити-

ческой лаборатории ООО ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск). Проведены также измерения содержания радона в пробах газа с помощью переносного прибора «Альфарад +» производства НТМ-Защита. Также измеряли общую концентрацию соли кондуктометрическим способом по высоте покрова при растапливании проб льда. Точность относительных измерений составила 0,2 мг/дм³.

Для изучения особенностей структуры льда (его толщины, наличия газовых включений, загрязнения солями) без его разрушения использовалась ранее разработанная методика микроволновых радиометрических измерений [10, 12]. При установке микроволнового радиометра вблизи поверхности льда можно получить пространственное разрешение около 0,1 м. Был выбран сантиметровый диапазон, его длинноволновый участок. Данная область спектра оптимальна по ряду причин: высокая проникающая способность излучения в среду, незначительные интерференционные явления в слое льда толщиной 0,3–1 м при обычно используемых полосах частот 0,5 ГГц, а также практически полное отсутствие влияния сухого снежного покрова толщиной в десятки сантиметров на измеряемые параметры. При измерениях использо-



Рис. 3. Фотография микроволнового радиометра, установленного на сани
Fig. 3. Photo of a microwave radiometer mounted on a sledge

вали компенсационный радиометр на среднюю длину волны 7 см (частота 4,3 ГГц) с флуктуационным порогом чувствительности 0,02 К при постоянной времени 1 с, который был изготовлен в ИПРЭК СО РАН. Такой прибор мог измерять изменение толщины льда около 1 см при толщине льда около 1 м по приращениям радиояростной температуры. Фотография радиометра с автономным источником питания, установленного на сани, дана на рис. 3.

Результаты исследования

Исследование пропарины выполняли 25 и 28 марта 2015 г. Однако в это время началось таяние верхней границы льда с последующим разрушением ледяного покрова, что не позволило продолжить дальнейшие исследования. 25 марта удалось наблюдать визуально за особенностями структуры льда близлежащих к пропарине областей, а также выполнить измерения температуры воды и толщины льда. 28 марта проведены более детальные измерения температуры воды, толщины ледяного покрова, отобраны пробы воды, льда и газа, а также выполнены микроволновые

радиометрические измерения. Для изучения неоднородностей ледяного покрова была измерена его толщина в радиусе до 200 м от пропарины. Температура воздуха 28 марта 2015 г. в береговой зоне достигала +10 °С. Лёд в этот день оказался непрозрачным из-за таяния днём, перемерзания в ночное время верхнего слоя и образования сети мелких трещин и капилляров. Этот эффект связан с резкими колебаниями дневной и ночной температуры с переходом через 0 °С. Появление жидких включений во льду привело к затуханию микроволнового излучения, что не позволило использовать радиометрический метод для детальных исследований на больших площадях ледяного поля.

Характерная особенность обнаруженного объекта — заметное газоотделение через отверстие, проделанное при вскрытии относительно тонкого поверхностного слоя льда на пропарине. Глубина водоёма в данном месте — около 3 м, под ним не было скоплений донных органических отложений, так как участок соответствовал некоторому возвышению дна по сравнению с близлежащими участками (см. рис. 2, б). Пропарина имела вид колодца с расширением в нижней части с наклоном стенок приблизительно 30° от вертикали.

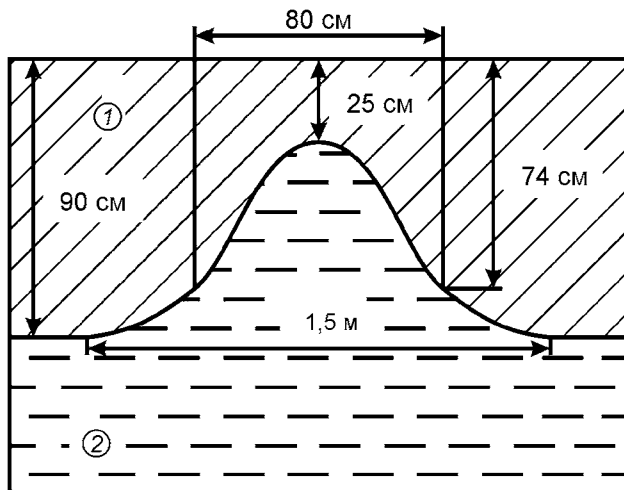


Рис. 4. Сечение ледяного покрова в области канала, по которому газ поступал в пропарину (расстояние от данного сечения до пропарины около 10 м):

1 – ледяной покров; 2 – вода

Fig. 4. The cross-section of the ice cover in the region of the channel, through which the gas entered the stream-through (the distance from a given section to stream-through ~ 10 m):

1 – ice cover; 2 – water

Температура воды в придонной области составляла $+5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Неожиданно оказалось, что от пропарины внутри льда отходил канал шириной около 0,5 м, по которому, по визуальным наблюдениям 25 марта 2015 г., двигались крупные газовые пузыри в направлении к пропарине. Их поперечные размеры достигали десятков сантиметров. Верхняя часть канала находилась приблизительно на глубине 20–30 см от поверхности ледяного покрова. В первом исследовании (25 марта 2015 г.) его удалось проследить на расстояние до 100 м от пропарины. Во втором (28 марта 2015 г.) из-за помутнения верхнего слоя льда, что видно на фото (см. рис. 1), визуальное проследить расположение канала оказалось трудно.

Вскрытие канала вблизи пропарины позволило установить его форму, которая в верхней части была округлой. На рис. 4 показано сечение канала, построенное по результатам его вскрытия. Объём поступающего в пропарину газа 25 марта 2015 г., по нашей оценке, достигал 10 л/мин. Анализ выполнялся путём отбора газа в сосуд, помещённый в канал. Газ поступал в виде отдельных неравномерных порций. Отметим, что пропарина была вскрыта в дни начала таяния верхнего слоя льда, поэтому газ мог свободно выходить

из неё в атмосферу. Для нескрытой пропарины со сплошным льдом на начальных стадиях её образования можно предположить закупоривание канала газовой пробкой. В этот период канал визуально обнаружить трудно. При измерениях температуры воды в это время в области выделения газа в пробуренной лунке обнаружены заметные её колебания – в пределах $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, что указывает на перемешивание воды в прилёдном слое. Это и приводит к росту поперечных размеров канала из-за его подтаивания. 28 марта 2015 г. скорость выделения газа была существенно ниже, наблюдалось прохождение в канале группы крупных пузырей с интервалом приблизительно 1 мин. Объём выделяемого газа составлял 1–2 л/мин. Температура в области выделения газа из пробуренной в канале лунки была равна $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а её колебания находились в пределах $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ отобранных образцов газа 28 марта 2015 г. (в % об.) показал следующие содержания: N_2 – 72,2; O_2 – 26,2; CH_4 – 0,33; CO_2 – 0,5. При определении пробы воды из лунки на наличие радона установлено, что активность пробы отсутствовала при точности измерений 10 Бк/л.

Измерения толщины льда и глубины водоёма выполнены в радиусе 200 м по ортогональным направлениям по линиям: север–юг, восток–запад. Интервал между точками измерений – 25 м. При этом из пробуренных для выполнения измерений лунок каких-либо заметных газовых выделений не было. Результаты измерений приведены на рис. 5. Минимальная толщина льда (92–93 см) находилась в области обнаруженной пропарины. На удалении 200 м толщина льда достигала 96–100 см. Это означает, что в области пропарины нижняя граница льда была несколько приподнятой в горизонтальной плоскости по отношению к периферии, т.е. наблюдается специфическая структура в виде ледяного купола. Несмотря на незначительный уклон (5 см на 100 м по его радиусу) в центре образования мог накапливаться газ с площади, накрытой купольной структурой.

Как уже отмечалось, при измерениях 28 марта 2015 г. наблюдалось таяние и лёд содержал некоторое количество жидкой воды, что не позволяло по радиометрическим измерениям определить пространственное положение канала на всём его протяжении в куполе. Жидкая вода в отличие от сухого льда сильно поглощает микроволновое излучение. Тем не менее, в некоторых

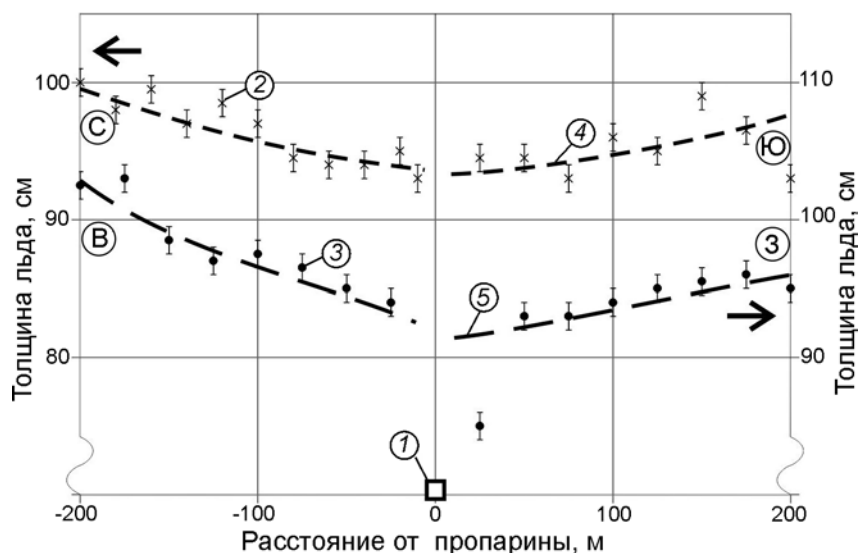


Рис. 5. Результаты измерений толщины льда по двум направлениям: север–юг и запад–восток; стрелки на графиках указывают оси для соответствующих направлений; сдвиг значений толщины льда по осям 10 см для устранения совпадения графиков.

1 – положение пропарины; 2, 3 – данные измерений толщины льда с указанием погрешности по направлениям север–юг и запад–восток соответственно; 4, 5 – усреднённая толщина льда по направлениям север–юг и запад–восток соответственно; отсчёт расстояний ведётся от пропарины, толщина льда на пропарине не указана

Fig. 5. The results of measurements of the ice thickness in two directions: North–South (S–N) and East–West (E–W); the arrows on the graphs indicate the axes for the corresponding directions; the shift of the values of the ice thickness along the axes of 10 cm to eliminate the coincidence of the graphs.

1 – the ice streamthrough position; 2, 3 – data of ice thickness measurements with an indication of errors in the directions North–South and West–East, respectively; 4, 5 – the average thickness of ice in the directions North–South and West–East, respectively; the distance is calculated from the ice streamthrough, the ice streamthrough is not indicated

областях ледяного покрова (там, где отсутствовало таяние) при пересечении канала в перпендикулярном его оси направлении наблюдали понижение радиояркостной температуры на 15 К (рис. 6), которое было подтверждено расчётами на основе геометрических размеров структуры.

Обсуждение результатов

Структура пропарины и ледяного покрова.

Самый важный результат исследования ледяного покрова в районе пропарины – обнаружение куполообразной структуры диаметром около 400 м. В центре купола собирались газы с его площади при таянии льда на нижней границе покрова. Газовые включения во льду могли накапливаться в нём в течение зимы как в результате захвата растворённого в воде газа с составом, близким к составу воздуха, так и за счёт выделений при деструкции донных органических отложений. Образование купола можно

связать с особенностями тепловых потоков исследуемого водоёма и, как следствие, подтаивания нижней границы льда в конце зимнего периода [13]. По-видимому, величина теплового потока со дна в область под центром купола выше, чем для других участков. Возможна также деформация (поднятие) некоторых областей ледяного покрова из-за его тепловых деформаций при суточных колебаниях температуры воздуха. Такой эффект авторы наблюдали ранее на близко расположенном оз. Тасей перед началом разрушения ледяного покрова по различию уровня воды в лунке на расстоянии порядка 100 м.

Интересная особенность структуры ледяного покрова – канал, по которому выделяющиеся газы поступали в центр купола. Обнаружен один канал, простирающийся в область меньших глубин озера в западном направлении (см. рис. 2, б). В летнее время здесь наблюдали заросли высшей водной растительности и, следовательно, можно было бы ожидать заметные количества донных органических отложений. При

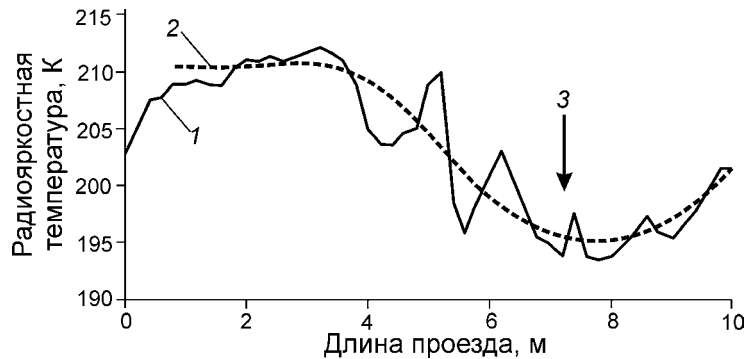


Рис. 6. Результат измерений радиояркостной температуры ледяного покрова с помощью радиометра при длине волны 7 см при пересечении внутреннего канала, по которому двигались газовые пузыри к пропарине: 1, 2 – результаты расчётов для влажного льда; 3 – расположение канала; измерения выполнены на горизонтальной поляризации при угле наблюдения 45°

Fig. 6. The results of measurements of the radio brightness temperature of the ice cover with the help of a radiometer at a wavelength 7 cm at the intersection of the internal channel along which the gas bubbles moved to the ice streamthrough: 1, 2 – results of calculations for wet ice; 3 – channel arrangement; the measurements were made on horizontal polarization at an observation angle 45°

их деструкции происходило выделение газов, которые вмёрзали в ледяной покров при его становлении. Появление канала можно связать с локальным усилением таяния льда из-за вертикального перемешивания воды за счёт перемещения пузырей. При этом лёд над каналом становился более тонким по сравнению с окружающим ледяным покровом. Скорее всего, на исследуемом водоёме каналы начинали формироваться в начале марта. Можно предположить существование их сети. По данным работы [14], на близком по химическому составу вод и географическому положению оз. Арахлей в конце февраля – начале марта появляются первые признаки нарушения сплошности льда. Это было выяснено в предыдущих исследованиях авторов при измерениях концентрации солей по толщине ледяного покрова. Например, 21 февраля 1997 г. концентрация соли имела значения, варьируя по высоте в пределах 7–11 мг/дм³, в то время как 23 января 1997 г. она была равна 2,5 мг/дм³ с колебаниями по высоте не более 0,2 мг/дм³ от среднего значения.

Особенности газового состава. Газовый состав отобранных проб из канала 28 марта 2015 г. показал преобладание азота и кислорода. Анализ газового состава льда выполнен также на других двух участках, специально выбранных при отборе газа 11 марта 2015 г. На них визуально наблюдали крупные замороженные газовые пузыри с горизонтальными размерами в десятки санти-

метров. Содержание азота в газе, полученном из керна льда, составило 78,6–79,5%, кислорода – 19,6–20,5%, углекислого газа – 0,1–0,3%. Содержание метана оказалось низким – (8–9)10⁻³%. Возможно, произошло его окисление при длительном нахождении в контакте с кислородом. В газе, отобранном непосредственно из канала, содержание метана, вероятно по этой причине, выше, так как в нижнюю часть ледяного покрова он был захвачен позже, чем в верхние слои льда.

Исследованию донного газоотделения из органических отложений Ивано-Арахлейской группы озер, куда входит и оз. Шакшинское, посвящена работа [9]. В ней приведены данные о газовом составе льда, образовавшемся в октябре–декабре. Содержания метана, полученного из газовой фракции льда (1–3%), заметно меньше по сравнению с собираемым в ловушки, которые были установлены в водной среде (около 10–30%). Содержание азота в пробах составляло более 80%, содержание кислорода находилось в пределах 7–18%. Отмечено увеличение содержания метана в нижнем слое льда, а также тот факт, что объёмные концентрации различных составляющих газовых пузырьков несомненно отличаются от исходных с течением времени.

Совпадение полученных нами данных о составе газа и результатов исследований работы [9] подтверждает предположение, что газ в канал поступал при таянии нижней границы льда. Интересно и то, что состав газа во льду близок к со-

ставу газа атмосферы (N_2 – 78%; O_2 – 21%). Вероятно, проницаемость льда оз. Шакшинское для атмосферных газов такая, что за несколько недель газовый состав пузырей становится аналогичным составу атмосферного воздуха. Отметим, что проницаемость пресного льда для газов по сравнению с морским льдом считается незначимой. Высокая проницаемость морского льда была отмечена ещё в работе [15], что особенно заметно для летнего периода [16]. Так, скорость проникновения CO_2 через морской лёд при -7 °С составляет 60 см/ч (определение выполнено при достижении относительного объёмного содержания исследуемого газа в пробе 10^{-3}). По этим данным, оценённый коэффициент проникновения составляет $2 \cdot 10^{-5}$ см²с⁻¹атм⁻¹ [15]. Для пресного льда эта скорость на 4–5 порядков ниже. При повышении температуры среды скорость проникновения газов возрастает.

В некоторых случаях, например для неглубоких эвтрофированных пресных озёр, характерен существенный рост проницаемости льда для газов. Лёд таких озёр содержит некоторое количество захваченной в него высшей водной растительности, планктонных организмов и продуктов их жизнедеятельности. При приближении температуры среды к 0 °С в ледяном покрове по этой причине заметно возрастает объём жидкой фазы, что усиливает проницаемость льда для газов, как и в случае морского льда [16]. Появление жидкой фазы в пресном льду в начале марта также подтверждается в работе [14]. Кроме того, кристаллы в ледяных покровах озёр расположены главными оптическими осями «С» вертикально, а их базисные плоскости с гексагональными кольцами – горизонтально, что похоже на вертикальную трубчатую структуру с диаметром «трубок» около 0,45 нм [17]. Такое расположение кристаллов наблюдали при поляризационных оптических измерениях пропускающей способности льда исследуемого озера.

Определённую роль могут играть суточные изменения температуры льда. Внутри газовых пузырей в течение зимы образуются мелкие плотно упакованные кристаллики льда. При этом давление газа из-за конденсации и испарения в полости может варьировать и, как следствие, возможно вытеснение или всасывание атмосферных газов с образованием (или расширением) каналов небольшого диаметра. Подоб-

ные каналы наблюдались нами в начале марта на свободной от снега поверхности ледяного покрова оз. Шакшинское. На большей части поверхности были установлены небольшие высыпания в виде фрагментов инея размерами 1–2 мм. При этом на некоторых участках поверхности с размерами порядка десятков сантиметров ледяной покров был зеркально гладкий. Возможно, это были участки льда с горизонтальным расположением оси «С». В начальной стадии формирования ледяного покрова часто наблюдается его ветровое разрушение с последующим замерзанием фрагментов битого льда. В результате первичное пространственное распределение главной оптической оси кристаллов на некоторых участках ледяного покрова в его верхней части нарушается.

Гипотеза о механизме образования пропарины. Остаётся открытым вопрос о формировании пропарины, которая имеет относительно крутые стенки в виде колодца в ледяном покрове. Очевидно, что её образование связано со сложными нелинейными явлениями, характерными для процессов самоорганизации [18, 19]. В качестве примера можно привести полигоны в виде шестигранных колец, кругов и других форм упорядочения, возникающие при замерзании увлажнённых грунтов (структурные грунты). Несмотря на их широкое распространение в природной среде, достаточно обоснованная теория образования таких объектов отсутствует. Плохо изучена и физика воды при 0 °С и более низких температурах. Например, пластическая деформация льда при появлении механических напряжений, как было установлено в недавних исследованиях, приводит к возникновению автоволн пластической деформации среды [20]. Эти процессы могут определять особенности механизма формирования пропарины.

Однако её главная особенность заключается, по-видимому, в возникновении вертикального перемешивания при появлении когерентной структуры из-за локальной неустойчивости водной среды [18, 21]. Неустойчивость могла возникнуть при появлении крупного газового пузыря в вершине купола, уменьшении теплопроводности в вертикальном направлении на границе вода–лёд и увеличении температуры воды верхних слоёв из-за притока тепла со дна озера. Этот приток в конце зимы и особенно в

весенний период по мере накопления газа создал предпосылку зарождения пропарины и её последующего быстрого роста в результате вертикального перемешивания воды.

Определённая сложность для исследования пропарин заключается в трудности их обнаружения, особенно при наличии снежного покрова. По нашему мнению, для этой цели можно использовать не только микроволновую радиометрию, но и активные (радарные) спутниковые измерения. Оба метода хорошо известны [11, 22], и их применение для изучения ледяных покровов пресных водоёмов эффективно из-за невысоких электромагнитных потерь во льду. Значение скин-слоя в пресном льду составляет около 1 м для коротковолновой части сантиметрового диапазона и около 100 м для длинноволновой его части. При этом и радарный, и радиометрический методы измерений имеют свои особенности. Радарный метод позволяет регистрировать рассеивающие свойства объекта, т.е. резкие изменения свойств среды с размерами порядка длины волны излучения [2], но он неэффективен для объектов с плавным изменением границ между средами или толщины слоёв. Радиометрический метод, напротив, информативен для исследования объектов с плавным изменением параметров (диэлектрическая проницаемость, температура, толщина льда). Это важно для изучения ледяного покрова пресных водоёмов. Области, где образуются пропарины, можно исследовать и при помощи ИК-радиометрии высокого разрешения, так как при уменьшении толщины льда температура верхней поверхности покрова заметно изменяется. Этот метод можно использовать при измерениях характеристик морского льда с ИСЗ [23].

Вместе с тем случаи больших скоплений газа в ранее выполненных радиофизических исследованиях ледяных покровов не рассматривались. Измерения, представленные в данной работе, и ранее выполненные микроволновые радиометрические измерения (см. рис. 2, а) с самолётов существенно отличаются по времени их выполнения. Но, если принять предположение о повторении параметров ледяных образований озера в разные годы, то можно сделать некоторые дополнительные выводы об особенностях обнаруженной пропарины. На рис. 2 крестом отмечена область, где была обнаружена пропарина

в марте 2015 г. Вблизи этой области, по данным 1989 г., наблюдали значительное понижение радиояркостной температуры, которое в свете новых результатов можно отождествить: а) с областью пониженной толщины льда; б) с наличием множественных каналов, заполненных водой; в) с образованием крупных скоплений газов на нижней границе льда в купольной структуре. Из-за низкого пространственного разрешения (500 м) по радиоизображению (см. рис. 2, а) сложно сделать определённые выводы. Поэтому в дальнейшем необходимо обеспечить существенно более высокое разрешение — до 1 м и лучше. В настоящее время такое разрешение достигнуто для спутниковых радаров с синтезированной апертурой. Высокое разрешение для микроволновой радиометрии можно получить только при установке приборов на низколетящие аппараты или судна на воздушной подушке.

Выводы

1. Выполненное исследование показало, что в ледяном покрове неглубокого пресноводного эвтрофированного оз. Шакшинское в конце ледостава образовалась небольшая пропарина — область с тонким поверхностным слоем льда. Она имела овальную форму с размерами $2 \times 3 \text{ м}^2$, а в сечении — вид колодца с расширением в нижней части. Интерес к такому объекту связан с тем, что пропарины, в отличие от полыньи, образуются после установления ледяного покрова и при отсутствии притока или стока вод. Исследованная пропарина возникла в центре купольной структуры, имеющей радиус не менее 200 м, с уклоном нижней поверхности льда около 5 см на 100 м. Формирование купола, вероятно, связано с таянием нижней границы льда в результате местного повышения теплового потока со дна водоёма или в результате тепловых деформаций ледяного покрова при суточных колебаниях температуры воздуха, достигающих $30 \text{ }^\circ\text{C}$ в конце зимы.

2. Обнаружено специфическое образование, соединённое с пропариной, в виде неширокого канала, внедрённого в тело ледяного покрова из водной среды. Канал пронизывал покров в горизонтальном направлении на расстояние не менее 100 м и заканчивался в центральной части купола в пропарине. Наблюдалось движение газовых пу-

зырей по каналу во вскрытую часть пропарины. Вопрос о числе каналов и особенностях их образования требует специального исследования.

3. Предполагается, что после образования купола начинается поступление газа в его центр с последующим образованием пропарины. Механизм появления пропарины связан с образованием тепловой изоляции верхнего слоя столба воды ото льда, что приводит к его нагреванию теплом, поступающим со дна озера. При этом проявляется гравитационная неустойчивость вертикального столба за счёт более прогретой воды с возникновением её циркуляции. Этот процесс возникает при температурах, для которых плотность жидкости верхнего слоя выше

плотности нижнего слоя. Такой механизм может объяснить особенности структуры пропарины — её небольшие линейные размеры, крутые стенки, а также быстрое формирование в ледяном покрове. Детали процесса образования подобной структуры требуют дальнейших исследований с использованием специальных методов.

4. Наличие снежного покрова на ледяном покрове затрудняет обнаружение пропарин и сопутствующих структур при оптических наблюдениях. Их можно выявлять и исследовать современными оперативными методами пассивной и активной радиолокации с пространственным разрешением не менее 1 м, что требует разработки соответствующих радиометрических систем.

Литература

1. Сокольников В.М. Причины, обуславливающие образование пропарин (ключей) в ледяном покрове Байкала // Тр. Байкальской лимнологической станции. Т. XV. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 65–94.
2. Ivanov A. Yu. Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images // Intern. Journ. of Remote Sensing. 2012. V. 33. № 23. P. 7579–7598. doi: 10.1080/01431161.2012.685981.
3. Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 629–637.
4. Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
5. Skogseth R., Nilsen F., Smedsrud L.H. Supercooled water in an Arctic polynya: observations and modeling // Journ. of Glaciology. 2009. V. 55. № 189. P. 43–53. doi: 10.3189/002214309788608840.
6. Holten V., Bertrand C.E., Anisimov M.A., Sengers J.V. Thermodynamics of supercooled water // Journ. of Chemical Physics. 2012. V. 136. Is. 9. P. 094507. doi: 10.1063/1.3690497.
7. Ингель Л.Х. «Отрицательная теплоемкость» статифицированных жидкостей // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 6. С. 694–699.
8. Martin S. A hydrodynamic curiosity: the salt oscillator // Geophys. Fluid Dynamics. 1970. V. 1. P. 143–160.
9. Тополов А.А. Донное газообразование в озерах Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1999. 77 с.
10. 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 радиометри-

References

1. Sokol'nikov V.M. Reasons causing formation polynya (keys) in ice cover Lake Baikal. *Trudy Baikalskoy limnologicheskoy stantsii*. Proc. of the Baikal limnological station. V. XV. Moscow–Leningrad: Russian Academy of Sciences, 1957: 65–94. [In Russian].
2. Ivanov A. Yu. Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images. *Intern. Journ. of Remote Sensing*. 2012, 33 (23): 7579–7598. doi: 10.1080/01431161.2012.685981.
3. Granin N.G., Granina L.Z. Gas hydrates and gas venting in Lake Baikal. *Geologiya i geofizika*. Russian Geology and Geophysics. 2002, 43 (7): 629–637.
4. *Glyatsiologicheskii slovar'*: Glaciological Dictionary. Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
5. Skogseth R., Nilsen F., Smedsrud L.H. Supercooled water in an Arctic polynya: observations and modeling. *Journ. of Glaciology*. 2009, 55 (189): 43–53. doi: 10.3189/002214309788608840.
6. Holten V., Bertrand C.E., Anisimov M.A., Sengers J.V. Thermodynamics of supercooled water. *Journ. of Chemical Physics*. 2012, 136 (9): 094507. doi: 10.1063/1.3690497.
7. Ingel' L.Kh. 'Negative heat capacity' in stratified fluids. *Physics-Uspokhi*. 2002, 45 (6): 637–644. doi: 10.1070/PU2002v045n06ABEH001185.
8. Martin S. A hydrodynamic curiosity: the salt oscillator. *Geophys. Fluid Dynamics*. 1970, 1: 143–160.
9. Topolov A.A. *Donnoe gazoobrazovanie v ozerakh Zabaikal'ya*. Bottom gassing in the lakes of Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka, 1999: 77 p. [In Russian].
10. 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*

- ческих 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.
11. *Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: physical foundations. Berlin, N.Y., London, Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
 12. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Поляков С.В.* Особенности радиояркости пресного ледяного покрова, содержащего газы // Исследования Земли из космоса. 1992. № 5. С. 13–21.
 13. *Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenнова G., Zdorovenнов R.* Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquatic Sciences. 2012. V. 74. № 4. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y.
 14. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д.* Миграция солевых включений в ледяных покровах озер Забайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 4. С. 98–102.
 15. *Gosink T.A., Pearson J.G., Kelley J.J.* Gas movement through sea ice // Nature. 1976. V. 263. P. 41–42. doi: 10.1038/263041a0.
 16. *Gosink T.A., Kelley J.J.* Annual sea ice. An air-sea gas exchange moderator. Fairbanks: University of Alaska, 1982. 17 p.
 17. *Petrenko V.F., Whitworth R.W.* Physics of Ice. New York: Oxford Univ. Press, 1999. 347 p.
 18. *Хакен Г.* Синергетика. Ч. 1, 2. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015. 880 с.
 19. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого. М.: Мир, 2002. 461 с.
 20. *Зуев Л.Б., Хон Ю.А., Баранникова С.А.* Дисперсия автоволн локализованного пластического течения // Журнал технич. физики. 2010. Т. 80. № 7. С. 53–59. doi: 10.1134/S106378421007008X
 21. *Zilitinkevich S.S.* Why turbulence dominates the atmosphere and hydrosphere? // Тр. Междунар. конф. «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность» / Ред. В.П. Мельников, Д.С. Дроздов. Тюмен: Epoha publishing house, 2015. P. 138–141.
 22. *Кирбижекова И.И., Чимитжоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Татьков Г.И.* Результаты исследования динамики ледового покрова оз. Байкал методами спутниковой радиолокации и GPS-навигации // Вестн. Бурятского науч. центра СО РАН. 2012. № 1 (5). С. 42–59.
 23. *Лебедев Г.А., Парамонов А.И.* Определение физических характеристик морского льда по данным инфракрасного зондирования с ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 72–80.
 24. *distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa.* Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2016, 13 (3); 150–161. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161. Research of Earth from space. [In Russian].
 25. *Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, N.Y., London, Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003: 613 p.
 26. *Bordonskii G.S., Krylov S.D., Polyakov S.V.* Features of radio brightness of fresh ice cover containing gas inclusions. *Issledovanie zemli iz kosmosa.* 1992, 5: 13–21. [In Russian].
 27. *Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenнова G., Zdorovenнов R.* Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. Aquatic Sciences. 2012, 74 (4): 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y.
 28. *Bordonskii G.S., Krylov S.D.* Sail inclusion migration in ice covers of Trans-Baikal lakes. *Izvestiya Ross. Akad. Nauk. Seriya Geogr.* Proc. of the RAS. Geographical Series. 2000, 4: 98–102. [In Russian].
 29. *Gosink T.A., Pearson J.G., Kelley J.J.* Gas movement through sea ice. Nature. 1976, 263: 41–42. doi: 10.1038/263041a0.
 30. *Gosink T.A., Kelley J.J.* Annual sea ice. An air-sea gas exchange moderator. Fairbanks: University of Alaska, 1982: 17 p.
 31. *Petrenko V.F., Whitworth R.W.* Physics of Ice. New York: Oxford Univ. Press, 1999: 347 p.
 32. *Khaken G.* Sinergetika. Ch. 1, 2. Synergetics. Pt. 1,2. Moscow: URSS: LENOAND, 2015: 880 p. [In Russian].
 33. *Prigozhin I., Kondepudi D.* Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures. Moscow: Mir, 2002: 461 p. [In Russian].
 34. *Zuev L.B., Khon Yu.A., Barannikova S.A.* Dispersion of autowaves in a localized plastic flow. Technical Physics. 2010, 55 (7): 965–971. doi: 10.1134/S106378421007008X.
 35. *Zilitinkevich S.S.* Why turbulence dominates the atmosphere and hydrosphere? *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii «Arktika, Subarktika: mozaichnost', kontrastnost', variativnost' kriosfery».* Proc. of Intern. Conf. «Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere». Eds. V.P. Melnikov and D.S. Drozdov. Tyumen: Epoha publishing house, 2015: 138–141.
 36. *Kirbizhekova I.I., Chimitzhorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Tat'kov G.I.* The results of Lake Baikal ice cover dynamics research by methods of ALOS PALSAR satellite radar-location and GPS-navigation. *Vestnik Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN.* Bulletin of the Buryat Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2012, 1 (5): 42–59. [In Russian].
 37. *Lebedev G.A., Paramonov A.I.* Determination of the physical characteristics of sea ice from infrared sounding data from an artificial satellite. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 2001, 2: 72–80. [In Russian].