

Радиолокационное исследование ледяного покрова озера Доронинского

Г.С. Бордонский¹, А.А. Гурулев¹, Ю.И. Кантемиров², А.О. Орлов¹,
П.Ю. Лукьянов¹, К.А. Щегрина¹, С.В. Цыренжапов¹

¹ *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия*

E-mail: lgc255@mail.ru

² *ООО «Компания Совзонд», Москва, Россия*

Выполнен анализ спутниковых радиолокационных изображений ледяного покрова меромиктического содового озера Доронинского, расположенного в Забайкальском крае. Одновременно проведены наземные микроволновые измерения параметров снежно-ледяного покрова озера, а также их гидрологических параметров. Выполнены относительные измерения мощности обратного рассеяния по трассам при установке аппаратуры на автомобиль. Обнаружена пятнистая структура радиоизображения, связанная с накоплением солей в поверхностном слое льда.

Ключевые слова: меромиктический содовый водоем, микроволновый диапазон, ледяной покров.

Введение

Изучение микроволновых свойств морского льда необходимо для совершенствования решения обратных задач дистанционного зондирования (Репина и др., 2012). Вместе с тем интерес представляют также водоемы с химическим составом вод, отличающимся от морской воды. Одним из таких водоемов является меромиктическое содовое озеро Доронинское, расположенное в Забайкальском крае. Минерализация данного водоема составляет около 20–35 г/л с резким ее изменением по глубине (Борзенко, Замана, 2011). В зимний период времени озеро, как и многие водоемы Забайкалья, покрыто ледяным покровом. Лед, как известно, является индикатором состояния водного объекта при дистанционном зондировании (Бордонский, Гурулев, 2008; Даркин и др., 2008).

Первые микроволновые измерения электромагнитных свойств льда содового озера Доронинского выполнены в работе (Бордонский, Крылов, 2000) на длине волны 8,6 мм. Было обнаружено, что фактор потерь слоев льда на глубине 10–40 см уменьшается приблизительно в два раза с конца ноября до начала февраля, несмотря на рост общей концентрации соли, которая вырастает за это время в 4 раза. В последующей работе по изучению содового озера было определено, что наблюдается анизотропия микроволновых потерь ледяного покрова на длинах волн 2,3 и 18 см, и связано это с наличием капилляров во льду (Гурулев и др., 2012). Однако детальное исследование влияния окружающей среды (водной, воздушной, тепловых потоков и т.д.) на электромагнитные свойства ледяного покрова содового озера не было выполнено.

Цель настоящей работы заключалась в радиофизических исследованиях ледяного покрова соленого водоема, состав исходной воды которого существенно отличается от состава морской воды и отсутствует перемешивание вод (меромиксия). Ставилась задача изучения возможности определения параметров водоема и особенностей окружающей

среды по микроволновым характеристикам ледяного покрова. Особый интерес к изучению данного озера связан с предположением о возможной роли содовых озер в происхождении жизни (Заварзин, 2000).

Был выполнен анализ снимков спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой COSMO-SkyMed, представленных компаниями «Совзонд» и «E-GEOS» по лицензии Итальянского космического агентства (ASI). Длина волны радиолокатора 3 см, пространственное разрешение радиоизображений 3 м. Даты получения снимков 16 и 17 марта 2012 г. Одновременно проведены наземные микроволновые измерения параметров снежного и ледяного покрова озера, измерения температуры и солености, а также выполнено измерение мощности обратного рассеяния по некоторым трассам через озеро при установке радиолокационной аппаратуры на автомобиль.

Объект исследования и его характеристики

Содовое озеро Доронинское, расположенное в Забайкальском крае, имеет площадь около 4,5 км² и глубину до 6,5 м. Озеро меромиктическое, его минерализация в верхнем слое до глубины 3,5 м составляет приблизительно 20 г/л, и в нижнем слое 28–35,5 г/л. Вода озера хлоридно-карбонатная натриевая. Среднее значение рН воды 10. Химический состав основных компонентов воды озера: Na⁺ – 36%; CO₃²⁻ – 23%; HCO₃⁻ – 22%; Cl⁻ – 17%. (Борзенко, 2009). Водоем находится в условиях резко континентального климата с характерным малым количеством осадков и значительными перепадами дневных и ночных температур.

Для натуральных измерений физико-химических свойств снежно-ледяного покрова нами была оборудована стационарная лаборатория, в которой устанавливалась измерительная аппаратура. Толщина льда в середине марта составила 115 см, толщина снежного покрова – 15–20 см. Температура внутри ледяного покрова измерялась с помощью терморезисторов, вмороженных в лед. Концентрация солей в ледяном покрове измерялась непосредственной выемкой керна льда и определялась кондуктометрическим способом для воды, полученной из льда, с использованием кондуктометра DIST-1.

Результаты этих измерений следующие. Уже на глубине 25 см температура льда слабо зависит от температуры воздуха и при суточных ее вариациях в 15°C на данной глубине вариации не превышают 2°C. Также наблюдается отставание ее хода внутри ледяного покрова из-за тепловой инерции. На *рис. 1* приведен график изменения количества солей в ледяном покрове по его высоте. Как видно из графика, измеренные значения составляют от 1,5 до 5,6 г/кг. По акватории водоема соленость льда также варьируется.

Что касается тонкого поверхностного слоя льда, то его соленость на порядок больше солености внутренних слоев льда. При отборе проб с поверхности ледяного покрова толщиной 5 мм в различных областях озера его соленость также существенно отличается, и значения составляют от 8 до 70 г/кг, т.е. на поверхности ледяного покрова расположен пространственно-неоднородный слой льда повышенной солености. Соскобы льда толщиной около 1 мм на разных участках ледяного покрова дали значение минерализации до 200 г/кг.

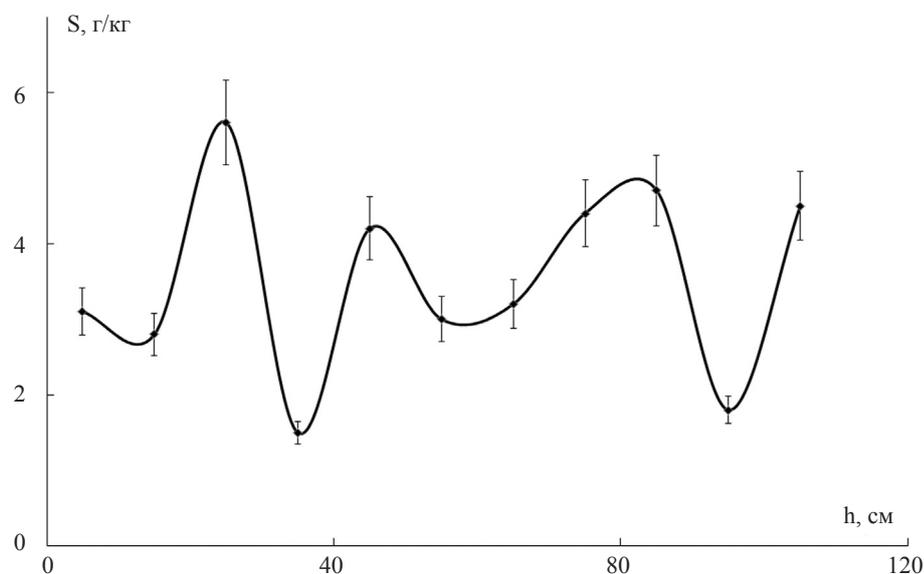


Рис. 1. Распределение солености по высоте ледяного покрова озера Доронинское

Методика микроволновых измерений

Радиолокационная съемка COSMO-SkyMed SAR выполнялась в режиме HH и HV. Наземные измерения включали в себя трассовые измерения мощности обратного рассеяния, измерения электромагнитных потерь и их анизотропию для верхнего слоя льда на длине волны 3 см. Выполнены также измерения действительной части относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и погонного затухания в интервале температур $0^{\circ}\text{C} \div -190^{\circ}\text{C}$ на длине волны 2 см.

При трассовых измерениях на автомобиль «Нива» устанавливали генератор непрерывного излучения на диоде Ганна на длину волны 3 см и приемник излучения. Выполнялись относительные измерения мощности обратного рассеяния на различных поляризациях.

Электромагнитные потери льда определялись радиометрически по собственному излучению образца на фоне холодного неба. Затухание исследовали при различном пространственном расположении блока льда по отношению к вектору электрического поля электромагнитного излучения атмосферы и льда. В этом случае определяли анизотропию затухания по различным пространственным направлениям в блоке, т.е. выясняли особенности тензора диэлектрической проницаемости. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Измерение затухания по различным направлениям выполнено на блоке льда в виде куба со сторонами около 22 см, изъятый из верхней части ледяного покрова. Температура блока льда составляла -10°C . Измерения выполнены 17 марта 2012 г. Концентрация солей во льду около 3 г/кг.

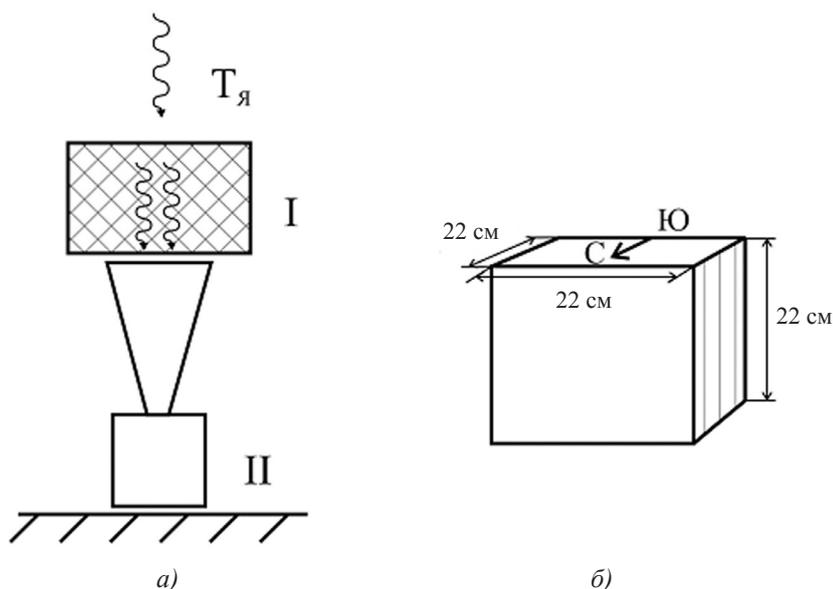


Рис. 2. а) Схема процедуры измерений затухания в блоке льда (I) с использованием микроволнового радиометра (II), принимающего излучение на линейной поляризации, $T_{я}$ – яркостная температура неба; б) размеры блока льда, извлеченного из верхней части ледяного покрова озера Доронинского в центральной части озера; стрелкой отмечено направление с юга на север, которое используется при изучении анизотропии льда

Для нахождения температурной зависимости ϵ' и погонного затухания измерения проводили с использованием охлаждаемой парами азота волноводной секции длиной в 10 длин волн изучения в среде (сечение волновода 8×17 мм² и длина 117 мм). Измеряли мощность проходящего излучения в зависимости от температуры. Из интерференционных максимумов и минимумов определяли ход изменения ϵ' .

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 3–5 представлены результаты микроволновых измерений ледяного покрова содового озера Доронинского.

На радиоизображении интенсивности обратного рассеяния для режима НН (излучений и прием на горизонтальной поляризации) обнаруживается трещина (или область торшения льда), проходящая через все озеро по линии Читино-Ингодинской впадины (рис. 3а). На снимке НV (излучений на горизонтальной, прием на вертикальной поляризациях) эта область торшения отсутствует. Визуально при наземном обследовании она также не различима, возможно, из-за наличия снежного покрова. Наблюдаемые визуально другие трещины на радиолокационных изображениях не заметны, следовательно, трещина (или небольшой торос) на рис. 3а имеет особое происхождение, напоминающее становые трещины (т.е. возникающие не случайным образом, на одних и тех же пространственных областях ледяного покрова). Единого мнения о причинах образования таких трещин еще нет, имеются дискуссии по данному вопросу (Бордонский, 2007).

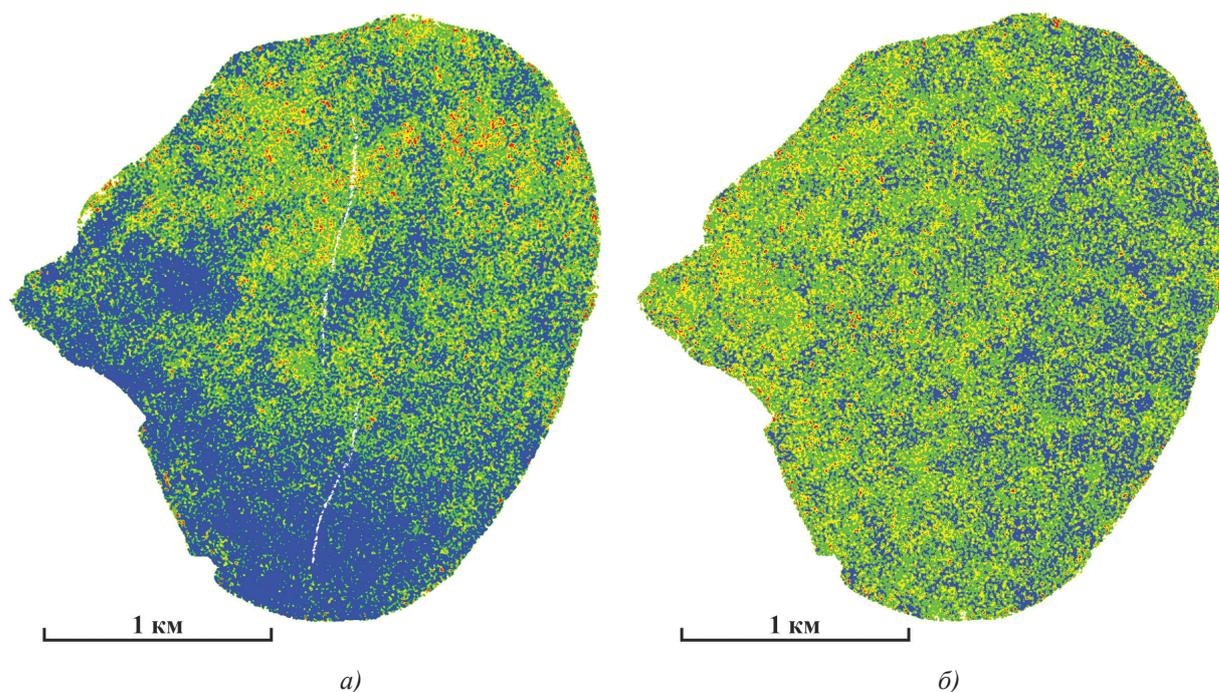


Рис. 3. Радиолокационное изображение озера Доронинское 16 марта 2012 г.:
 а) поляризационный режим HH; б) поляризационный режим HV

На снимке HH наблюдается более выраженная пятнистость изображения. Так как скин слой во льду имеет значение порядка 10 см, предполагается, что данная особенность обусловлена неравномерным распределением солености льда по акватории ледяного покрова. Прямые измерения солености в верхнем слое толщиной 0,5 см, как отмечено выше, дали разброс от 8 до 70 г/кг. При этих измерениях наблюдали резкие пространственные изменения солености на расстояниях порядка единиц метров. Прямые измерения были выполнены на нескольких участках, на всех наблюдали эти изменения солености.

Следует отметить, что температура воздуха 16–17 марта 2012 г. составила $-15^{\circ}\text{C} \div -5^{\circ}\text{C}$; следовательно, в слое повышенной солености существовала и повышенная концентрация жидких включений, так как температура среды была выше температуры эвтектики хлорида натрия. Радиолокационный снимок снежно-ледяного покрова озера Доронинского для более холодного периода был получен с использованием Radarsat на длине волны 5,6 см в конце февраля 2013 г. (Бордонский и др., 2013). В это время дневная температура не превышала -20°C . На полученном снимке при близком пространственном разрешении, равном 8 м, пятнистость изображения отсутствовала. Возможно, это связано с тем, что из-за низкой температуры льда процессы таяния и геохимические процессы в это время ослаблены.

Трассовые измерения ледяного покрова, так же как и радиолокационный снимок, показали заметную неоднородность коэффициента обратного рассеяния по трассе. Пример записи HH приведен на рис. 4. Как видно из графика, приземные измерения согласуются с данными, представленными на космоснимке (рис. 3).

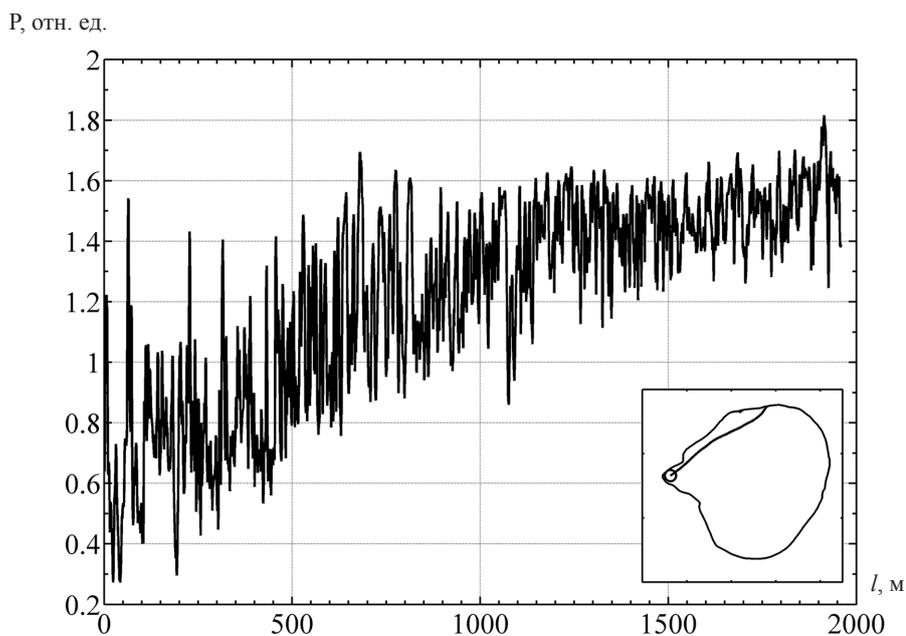


Рис. 4. Трассовая запись интенсивности обратного рассеяния озера Доронинского на длине волны 3 см. Режим поляризаций НН. 17 марта 2012 г. В нижнем правом углу показана трасса проезда, \circ – начало измерений

Затухание излучения на длине волны 3 см при ориентации волнового вектора перпендикулярно плоскости, соответствующей границам раздела ледяного покрова, составило в образце 10–11 дБ в зависимости от поляризации. Для направления волнового вектора в блоке льда, соответствующего плоскости параллельной границам раздела ледяного покрова, затухание сигнала составило 14 дБ для вертикальной поляризации и 12 дБ для горизонтальной поляризации. Таким образом, в данном случае разность потерь равнялась 2 дБ (на расстоянии 0,2 м) или 10 дБ/м.

На *рис. 5* представлены результаты измерений действительной части относительной диэлектрической проницаемости и погонного затухания на длине волны 2 см (частота 15,5 ГГц). Сравнение полученных данных с результатами измерений для случая морского льда (Богородский, Гаврилов, 1980) показывает их удовлетворительное совпадение, если учитывать зависимость диэлектрических свойств соленого льда от состава соли и предыстории образцов. Как отмечалось выше, электромагнитные потери содового озера существенно изменяются в течение зимы и при неизменной минерализации (Бордонский, Крылов, 2000). Это связывается с переходом рассолов в кристаллогидратную форму, например, при понижении температуры ниже эвтектической точки, с последующим метастабильным состоянием кристаллогидрата даже при некотором превышении температуры этого значения.

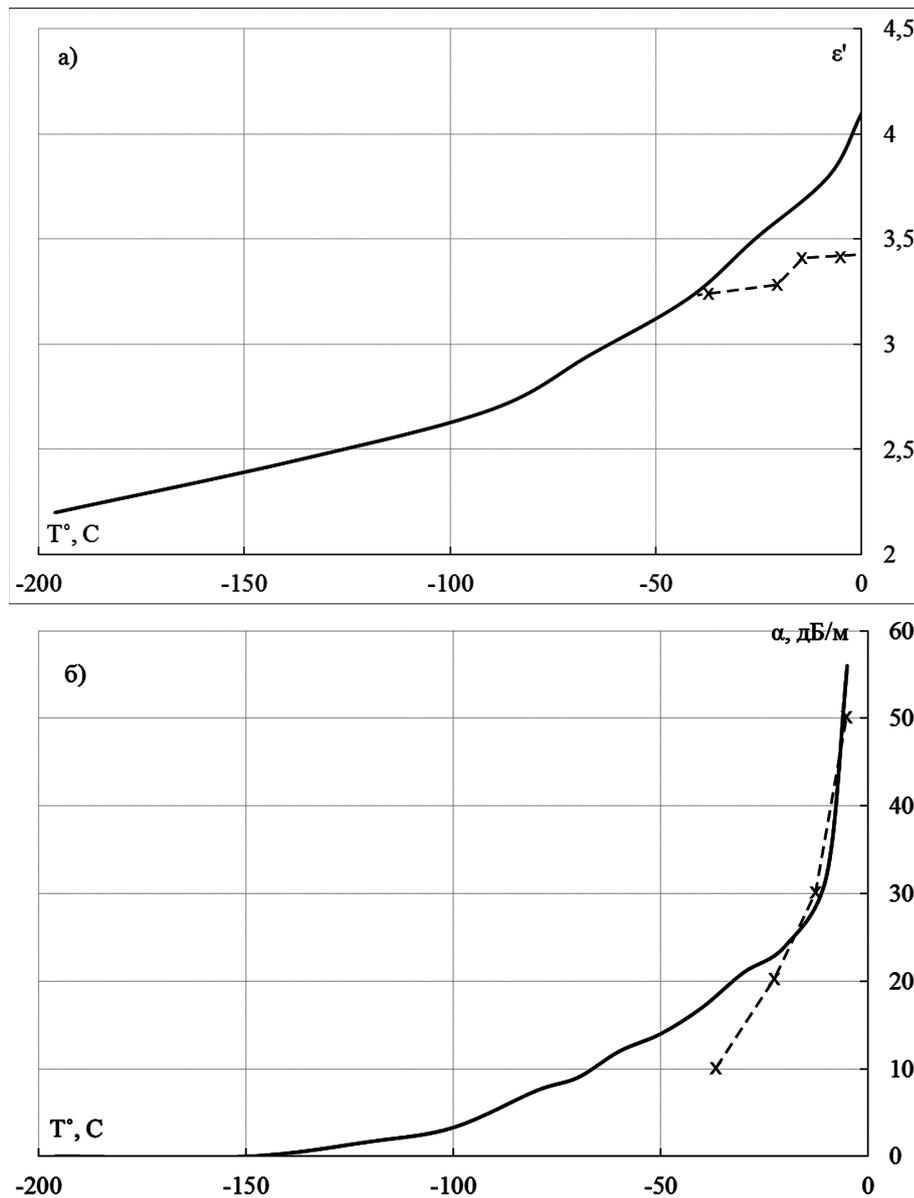


Рис. 5. Зависимости от температуры: а) действительной части относительной диэлектрической проницаемости и б) погонного затухания во льду на длине волны 2 см по измерениям в волноводе. Сплошная линия – содовый лед, штриховая линия – данные для морского льда (Богородский, Гаврило, 1980). Концентрация солей во льду 3 г/кг

Выводы

Таким образом, в результате измерений установлено:

- электромагнитные потери в сантиметровом диапазоне содового льда, образованного из карбонатно-хлоридных натриевых вод неглубокого водоема в интервале температур $-5^{\circ}\text{C} \div -20^{\circ}\text{C}$, близки в конце зимы по величине тому же параметру для однолетнего морского льда;
- обнаружена пятнистая структура радиоизображения на волне 3 см в режиме НН, в режиме НV она менее выражена; установлено накопление солей в верхнем слое ледяного покрова содового озера, определяемого особенностями тепловых потоков

в объекте в условиях резко континентального климата, которое создает изменение коэффициента обратного рассеяния в конце периода существования льда;

- при прямых измерениях электромагнитных потерь обнаружено большее поглощение на вертикальной поляризации, разница в затухании составляла ~ 10 дБ/м при солености 3 г/кг; по этой причине зондирование на вертикальной поляризации для определения подповерхностных образований может быть в некоторых случаях менее информативным для соленых льдов, в отличие от пресного;
- на радиоизображении в режиме НН обнаружена линейная структура (трещина, область торшения), проходящая через центральную часть озера и совпадающая с линией Читино-Ингодинской горной впадины, на которой располагается озеро Доронинское; на изображении НV трещина не обнаруживается; предполагается, что данная трещина является становой, т.е. определяется геолого-гидрологическими особенностями водоема.

Общий вывод выполненного исследования заключается в том, что имеется возможность изучения миграции солей в верхнем слое снежно-ледяного покрова в условиях резко континентального климата с использованием спутниковых РЛС.

Работа выполнена при поддержке междисциплинарного Интеграционного проекта СО РАН № 56 и гранта РФФИ № 12-02-31237.

Литература

1. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. 1980. Твердый переплет. 384 с.
2. *Бордонский Г.С.* Причины возникновения станowych трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–76.
3. *Бордонский Г.С., Гурулев А.А.* Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 210–215.
4. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д.* Миграция солевых включений в ледяных покровах озер Забайкалья // Известия РАН. Серия географическая. 2003. № 4. С. 98–102.
5. *Бордонский Г.С., Орлов А.О., Гурулев А.А., Щегрина К.А.* Изучение ледяного покрова соленых озер радиолокационным методом // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 5 (51). С. 112–114.
6. *Борзенко С.В.* Формы сероводорода в минеральных содовых водах озера Доронинское (восточное Забайкалье) // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2009. № 13. С. 54–57.
7. *Борзенко С.В., Замана Л.В.* Восстановленные формы серы в рапе содового озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Геохимия. 2011. № 3. С. 268–276.
8. *Гурулев А.А.* Радиотепловое излучение ледяных покровов пресных и слабосоленых водоемов: Дисс. ... канд. физико-математ. наук. М.: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2005.

9. Даркин Д.В., Митник Л.М., Митник М.Л. Спектры коэффициентов излучения молодого льда в микроволновом диапазоне по данным измерений со спутника Aqua (на примере Охотского и Японского морей) // Исследование Земли из космоса. 2008. № 1. С. 3–14.
10. Заварзин Г.А., Жилина Т.Н. Содовые озера – природная модель древней биосферы континентов // Природа. 2000. № 2. С. 45–55.
11. Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29–36.

Ice cover radar study of the Doroninskoye Lake

**G.S. Bordonskiy¹, A.A. Gurulev¹, Y.I. Kantemirov², A.O. Orlov¹,
P.Y. Lukyanov¹, K.A. Schegrina¹, S.V. Tsyrenzhapov¹**

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

E-mail: lgc255@mail.ru

²*«SOVZOND JSC», Moscow, Russia*

The analysis of satellite radar images of the ice cover meromictic soda lake Doroninskoye, located in Trans-Baikal region, were carried out. At the same time land microwave measurements of the snow-ice cover of the lake and their hydrologic parameters were studied. The measurements of relative power backscattering on the tracks using microwave instruments mounted at the car were carried out also. It was detected spotted structure of the radio images due to accumulation of salts in the surface layer of ice.

Keywords: meromictic soda lake, microwaves, ice cover.