

## Приземные микроволновые радиометрические измерения ледяного покрова оз. Байкал

Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, А.О. Орлов, П.Ю. Лукьянов, С.В. Цыренжапов

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
672014, Чита, Россия  
E-mail: lgc255@mail.ru*

Интерес к изучению ледяного покрова оз. Байкал микроволновыми методами связан с развитием систем РСА и уникальностью данного водоема. В настоящее время для измерений в основном используется радарный (активный) метод, что определяется его высоким пространственным разрешением. Однако радиометрический (пассивный) метод может дать принципиально иную информацию о состоянии ледяного покрова по сравнению с активным методом. Это связано с тем, что интенсивность радиотеплового излучения существенно зависит от увлажнения льда и состояния переходных слоев на границах сред. С другой стороны, интенсивность обратного рассеяния определяется неоднородностями объекта, размеры которых сравнимы с длиной волны излучения. Существующие спутниковые пассивные микроволновые системы имеют приблизительно в тысячу раз худшее пространственное разрешение. Поэтому в настоящей работе исследовались возможности микроволновых приземных радиометрических измерений при установке приборов на легкомоторный летательный аппарат – дельталет и судно на воздушной подушке. Это позволило достичь сравнимого с РСА пространственного разрешения. Выполнены измерения радиотеплового излучения ледяного покрова оз. Байкал на длинах волн 3 см; 2,3 см и 8,8 мм. Пространственное разрешение при приземных измерениях составляло ~ 1–20 м. Были выявлены области загрязнения льда выносами р. Селенга и возможным размножением планктонных организмов вблизи береговой зоны. При измерениях на близких длинах волн – 3 см и 2,3 см – обнаружены области льда со структурными неоднородностями по уменьшению коэффициента корреляции радиояркостной температуры. Наблюдали вариации радиояркости, определяемые неоднородностью толщины из-за неровностей верхней границы льда, а также области с отсутствием таких неровностей. Предполагается наблюдение и других разнообразных особенностей структуры ледяного покрова, например, участков донного газоотделения при захвате газов в лед. Представляется, что совместные приземные радиометрические и спутниковые РСА измерения позволят получить более полную информацию о состоянии природной среды Байкальского региона.

**Ключевые слова:** микроволновый диапазон, радиометрические измерения, ледяной покров, ледяные структуры, озеро Байкал.

### Введение

В работе (Бордонский и др., 2014) было отмечено, что микроволновая радиометрия позволяет получить, сравнительно с радарными измерениями, принципиально иную информацию о состоянии поверхностных образований, особенно, если достигается одинаковое пространственное разрешение. Практически, при сравнении с данными РСА, это возможно, если радиометрическая аппаратура устанавливается на авиационные носители.

Один из вариантов такой установки – легкомоторные летательные аппараты. Аппаратуру можно также устанавливать на автомобили и суда на воздушной подушке. Каждый из них по-своему удобен для детальных исследований тех или иных поверхностных образований, так как позволяет перемещать аппаратуру на сложных участках рельефа земной поверхности. Определенным преимуществом приземных радиометрических комплексов является возможность их быстрой адаптации под конкретную задачу (замена наборов используемых длин волн, поляризаций, углов зондирования, компоновка различных приборов и т.п.).

В настоящей работе, в плане реализации данной идеи, выполнены измерения радиотеплового излучения акватории оз. Байкал и прилегающих районов в зимний период времени, когда озеро покрыто ледяным покровом. С этой целью радиометрическая аппаратура сантиметрового и миллиметрового диапазонов устанавливалась на небольшой летательный аппарат – дельталет и судно на воздушной подушке.

### **Объект исследования**

Озеро Байкал интенсивно исследуется отечественными и зарубежными учеными. Это связывается, прежде всего, с большими запасами в нем ультрапресной воды. Уникальные параметры водоема используются для научных целей, например, на озере создан нейтринный детектор с расположением датчиков на глубинах более 1 км (Авронин и др., 2010).

В зимнее время водоем целиком покрывается ледяным покровом, толщина которого различна в северных и южных его областях. Значительные массы воды приводят к особенностям их циркуляции, что порождает специфические ледяные структуры. Они определяются также взаимодействием с атмосферой, воздействием сейсмических процессов, биологическими и антропогенными воздействиями.

По структурным особенностям льда можно дистанционными методами в микроволновом диапазоне изучать перечисленные выше процессы. Это связывается с высокой прозрачностью снега и пресного льда в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Например, становые трещины изучались радарными методами (Родионова и др., 2013), они же, как предполагается в работе (Бордонский, 2007), связаны с вихревыми течениями, порождаемые сейшами в глубоком водоеме. Недавно обнаруженные на оптических изображениях льда кольцевые структуры в тающем льду (Ivanov, 2012), можно, как предложено в работе (Бордонский, Крылов, 2014), изучать с использованием микроволновых радиометрических измерений. Колонии планктонных организмов, обнаруженные в начальный период таяния льда в капиллярах покрова и на границе лед-вода (Оболкина и др., 2000), могут эффективно регистрироваться радиометрическими методами (Бордонский, Крылов, 1994). В (Гурулев, Крылов, 2004) при изучении льда на протоках дельты реки Селенги показана возможность регистрации твердых частиц, которые были занесены в ледяной покров при ветровом переносе.

Можно также ожидать существование других видов структурных образований различного масштаба во льду Байкала. Их обнаружение возможно при совместных активных и пассивных измерениях радиофизических свойств ледяного покрова при одинаковом пространственном разрешении, достигающем одного метра.

Радарные измерения чувствительны к нарушениям структуры ледяной среды, а радиометрические – к появлению во льду незначительных количеств жидких включений. В настоящее время из-за низкой разрешающей способности спутниковых радиометров имеется мало работ по микроволновой радиометрии Байкала.



Рис. 1. Радиометрический комплекс (длины волн 8,8 мм, 2,3 см и 3 см), установленный на судно на воздушной подушке «Хивус»

### Описание измерений

Место базирования экспедиции было выбрано в пос. Истомино на восточном берегу оз. Байкал вблизи южной части дельты р. Селенга. Выполнялись как измерения комплексом радиометров, установленным на дельталет, так и измерения с борта судна на воздушной подушке. Средняя толщина ледяного покрова оз. Байкал в местах исследований варьировалась от 60 до 70 см.

Полеты выполнены над дельтой Селенги, а судно на воздушной подушке прошло по трассе от берега вглубь озера. В последнем случае трасса пролегла до ранее обнаруженной особого вида структуры в ледяном покрове, называемой «пропаринной». Эти структуры имеют вид полыньи с размерами от единиц до сотен метров. Природа их образования изучена недостаточно. Один из возможных механизмов их появления связывается с выбросами газов со дна озера. Описание разнообразных ледяных структур Байкала и возможности их исследования спутниковыми методами радиозондирования представлено в (Ivanov, 2012).

Измерительная аппаратура в составе трех радиометров на длины волн 8,8 мм, 2,3 см и 3 см устанавливалась на судно на воздушной подушке «Хивус». Судно позволяло двигаться по поверхности льда и воды со скоростью до 80 км/ч. Оно удобно для детальной съемки объекта в сложных ледовых условиях Байкала, где существует опасность внезапного разрушения ледяного покрова. В данном случае достигается разрешение по поверхности порядка одного метра. Угол наблюдения составлял значение около 50°. Судно с установленными на нем радиометрами показана на рис. 1.

На другой носитель – дельталет марки «Фрегат» – устанавливали два радиометра на длины волн 8,8 мм и 2,3 см. Радиометр на волну 2,3 см мог работать в режиме сканирования,

позволяя получить пять элементов изображения в скане. Частота сканирования 1 Гц. Чувствительность на пиксель 0,2 К для сантиметрового диапазона и 0,6 К для миллиметрового. При высоте полета 200 м пятно диаграммы направленности на поверхности в сантиметровом диапазоне составило ~10 м, а в миллиметровом ~20 м. Калибровка радиометров проводилась по открытой водной поверхности и холодной атмосфере, переотраженной металлическим листом. Точность абсолютных измерений порядка 1 К. Угол наблюдения составлял 15–20°.

Исследование проводилось в марте 2014 года. К сожалению, из-за погодных условий провести длительные испытания аппаратуры на дельталете не удалось. Недостаток этого



Рис. 2. Радиометры (длины волн: 8,8 мм и 2,3 см), установленные на дельталет «Фрегат»

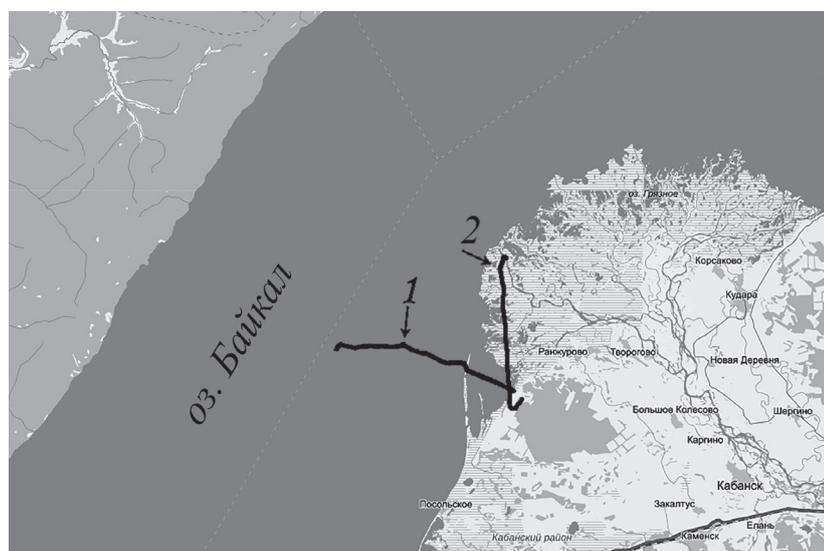


Рис. 3. Траектории движения: 1 – «Хивуса»; 2 – «Фрегата»

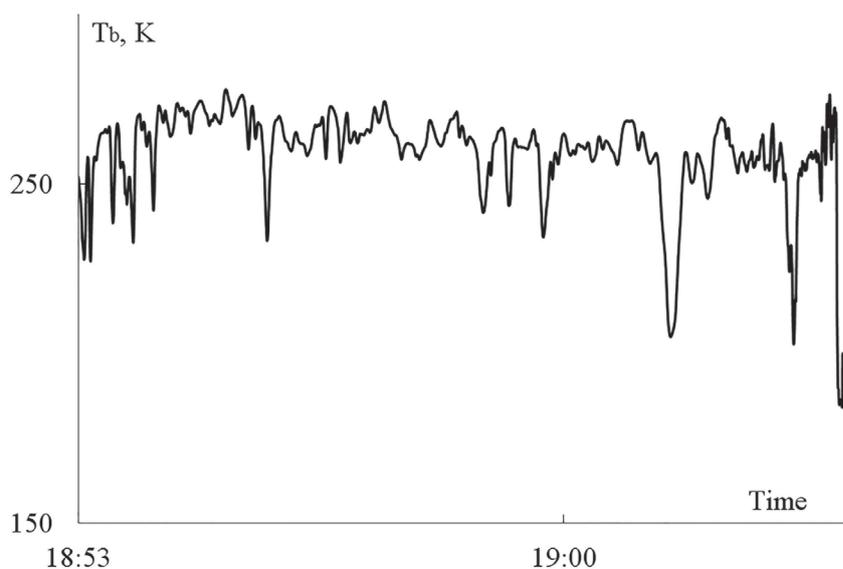
авиационного средства – сложности полетов при сильном ветре и низких температурах воздуха. Фотография дельталета с установленными в хвостовой части летательного аппарата радиометрами приведена на *рис. 2*.

Траектории движения, вдоль которых проводились измерения радиояркостной температуры, показаны на *рис. 3*. Соответствующие записи радиояркостной температуры приведены на *рис. 4; 5a,b,c*.

### Результаты и их обсуждение

Как видно из представленных записей, наблюдались вариации сигналов на различных масштабах – от метров до километров. При этом выявились разнообразные структурные особенности ледяного покрова озера и дельты реки Селенга. Эти вариации связываются с различной толщиной льда и снежного покрова, наличием участков открытой воды.

На *рис. 4* хорошо просматриваются быстрые вариации радиояркостной температуры при пересечении протоков Селенги, где наблюдалось резкое уменьшение сигнала.



*Рис. 4. Трассовая запись радиояркостной температуры на длине волны 2,3 см, полученная с дельталета 20 марта 2014 г.*

На *рис. 5a,b,c* графики сигналов на трех длинах волн показывают монотонное изменение радиояркостной температуры по мере удаления от берега. Это изменение связано с некоторым загрязнением льда из-за выноса частиц и солей водами реки Селенга, которое максимально вблизи берега. Кроме того, вблизи береговой зоны на расстоянии в несколько километров обнаруженное возрастание радиояркости связывается с повышенной концентрацией планктонных организмов, захваченных в лед, и определяемое антропогенным загрязнением прибрежных вод (Тимошкин и др., 2014).

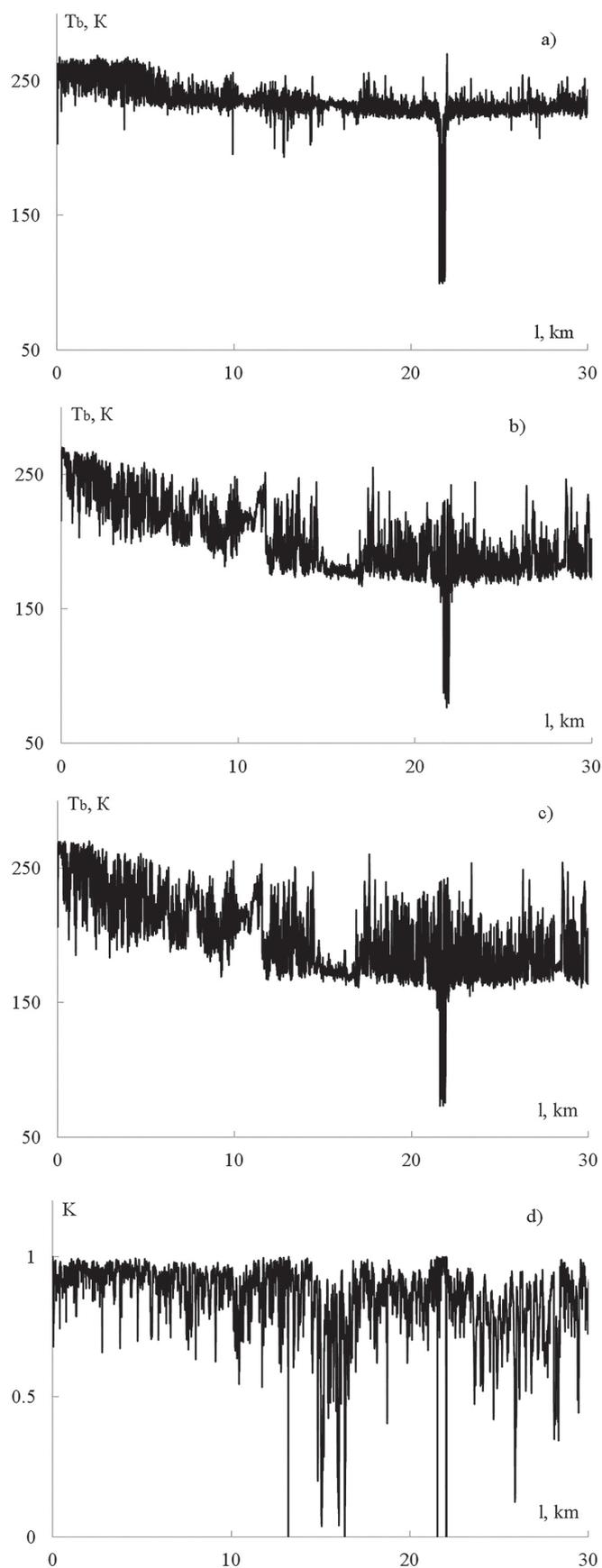


Рис. 5. Трассовые записи радиояркостных температур ( $T_b$ ) на длинах волн а) 8,8 мм; б) 2,3 см; в) 3 см и д) коэффициента корреляции ( $K$ ), полученные с использованием судна на воздушной подушке. Измерение на горизонтальной поляризации

Возможность индикации водорослей, замороженных в лед, была показана в (Бордонский, Крылов, 1994). Наблюдались заметные быстрые вариации радиояркостности. Они связаны с неровностями поверхности льда при его формировании, т.к. этот процесс протекает с многократным разрушением льда вследствие волнового движения воды и ветрового воздействия в начальной стадии формирования покрова.

Хотя использование близких длин волн в ряде случаев не выявляет различий структуры ледяного покрова, при вычислениях коэффициента корреляции радиояркостной температуры на 2,3 см и 3 см (*рис. 5d*) обнаружены области, где он существенно отличается от единицы. Данная особенность означает, что имеются структуры, свойства которых изменяются вглубь покрова на расстояниях порядка 1 см. Протяженность таких структур достигала километра. В этой же области исчезали значительные флуктуации сигналов, что характерно для объекта с гладкими границами (*рис. 5a,b,c* на участке трассы 14–15 км и 28 км).

При выезде «Хивуса» на открытый участок воды (где находилась «пропарина») в районе 22 км радиояркостная температура, как и ожидалась, существенно понизилась, а коэффициент корреляции для сигналов в сантиметровом диапазоне приблизился к единице. Характерной особенностью «пропарины», выявленной при радиометрических исследованиях были резкие перепады сигналов, между ледяным покровом и открытой водой, что указывает на отсутствие протяженной области с плавным изменением толщины льда.

## Выводы

Выполненные радиометрические измерения ледяного покрова оз. Байкал при приземных измерениях с пространственным разрешением 1-20 м могут дать информацию о следующих особенностях водоема:

1. областях загрязнения льда и его интенсивности при выносе загрязняющих веществ возле мест впадения в озеро рек по возрастанию радиояркостной температуры;
2. повышении концентрации планктонных организмов в береговой зоне озера, в том числе нежелательных видов (о их появлении сообщалось в (Тимошкин, 2014)) по возрастанию радиояркостной температуры;
3. областях структурных нарушений покрова с характерными размерами порядка сантиметра по глубине с использованием радиометрических измерений на близких длинах волн в сантиметровом диапазоне по коэффициенту корреляции радиояркостной температуры;
4. областях таяния льда в начальной стадии или внедрение в него жидких включений без видимых внешних изменений покрова;
5. участках ледяного покрова с выбросами донных газов при их накоплении в нем по изменению микроволновой излучательной способности системы лед – вода.

Исследование также подтвердило целесообразность использования коротковолновой части сантиметрового диапазона для выявления внутренних неоднородностей и миллиметро-

вого диапазона для изучения снежного покрова и граничного с ним слоя льда. Совмещение измерений РСА для получения изображений больших площадей и приземных радиометрических измерений для более полной идентификации объектов представляется весьма эффективным инструментом изучения не только ледяного покрова, но и природной среды Байкальского региона. Ледяной покров в данном случае является индикатором состояния природной среды.

Работа выполнена при частичной поддержке Международной швейцарско-русской научно-исследовательской экспедиции «ТрансЕвразийский перелет Леман-Байкал».

## Литература

1. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белоланчиков И.А., Богородский Д.Ю. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ-200+. Препринт ИЯИ РАН 1265/2010. 2010. 23с.
2. Бордонский Г.С. Причины возникновения становых трещин в ледяных покровах озер // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 69–76.
3. 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.
4. Бордонский Г.С., Крылов С.Д. Мониторинг состояния озер по радиотепловому излучению ледяного покрова // География и природные ресурсы. 1994. № 1. С. 170–175.
5. Бордонский Г.С., Крылов С.Д. О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 27–31.
6. Гурулев А.А., Крылов С.Д. Использование радиотеплового излучения для контроля загрязнения дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. 2004. №1. С. 72–75.
7. Оболкина Л.А., Бондаренко Н.А., Дорощенко Л.Ф. О находке криофильного сообщества в озере Байкал // ДАН. 2000. Т. 371. № 6. С. 815–817.
8. Родионова Н.В., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Изменение текстурных параметров ледяного покрова южной части озера Байкал в период ледостава 2010 года по радарным данным ALOS PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 173–181.
9. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А., Томберг И.В., Вишняков В.С., Мальник В.В. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* и *Stigeoclonium* (Chlorophyta) в прибрежной зоне Южного Байкала. // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50. № 5. С. 15–26.
10. Ivanov A.Yu. Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images // Int. J. Remote Sensing. 2012. Vol. 33. Iss. 23. pp. 7579–7598.

## Surface microwave radiometric measurements of Lake Baikal ice cover

G.S. Bordonskiy, A.A. Gurulev, A.O. Orlov, P.Yu. Lukyanov, S.V. Tsyrenzhapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS  
Chita 672014, Russia  
E-mail: lgc255@mail.ru*

The interest in exploration of Lake Baikal ice cover by microwave methods is caused by the development of new SAR systems and also by the uniqueness of this lake. The radar (active) method is mostly used for this purpose at present, because of high spatial resolution of SAR images. However, the radiometric (passive) method of microwave remote sensing may provide new information about ice cover state in contrast to the active method. This is due to the fact that thermal radiation intensity considerably depends on ice wetness and state of intermediate layers at media boundaries. On the other hand, the intensity of backscatter is formed by object inhomogeneity whose sizes are comparable to radiation wavelength. The existing satellite passive microwave systems have very poor spatial resolution. In this paper, the possibilities of surface microwave radiometric measurements, when placing the instruments on single-engine aircraft – ultralight trike and hovercraft are examined. These positions of the instruments made it possible to achieve close to SAR spatial resolution. The measurements of the microwave thermal radiation of Lake Baikal ice cover at the wavelengths of 3 cm; 2.3 cm and 8.8 mm were carried out. Spatial resolution, when implementing surface measurements, archived 1–20 m. The areas of ice pollution by waters of Selenga River and increasing plankton concentration near the lake shore were determined. When measuring

at close wavelengths of 3 cm and 2.3 cm the areas of ice with structural inhomogeneities were determined by decreasing of correlation coefficient of brightness temperature. Radio brightness variations, which are identified by the inhomogeneity of thickness because of the inequalities of upper ice border, as well as areas with the lack of such inequalities, were observed. It is suggested to carry out observations of other different structural ice cover peculiarities, for example, areas of bottom gas liberation with the capture of gases into ice. Combined surface radiometric and satellite SAR measurements will make it possible to obtain more information about the state of the Baikal Region natural environment.

**Keywords:** microwaves, radiometric measurements, ice cover, ice structures, Lake Baikal.

## References

1. Avrorin A.V., Ainutdinov V.M., Balkanov V.A., Belolaptikov I.A., Bogorodskii D.Yu. Baikal'skii glubokovodnyi neitrinnyi teleskop NT-200+ (The Baikal neutrino telescope NT-200), *Preprint IYal RAN 1265/2010*, 2010, 23 p.
2. Bordonskii G.S. Prichiny vozniknoveniya stanovykh treshchin v ledyanykh pokrovakh ozer (The causes of permanent cracks in ice covers of lakes), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2007, No. 2, pp. 69–76.
3. Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V. Razlichie kartin radarnykh i radiometricheskikh izmerenii (na primere ledyanogo pokrova evtrofirovannogo ozera) (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.
4. Bordonskii G.S., Krylov S.D. Monitoring sostoyaniya ozer po radioteplovomu izlucheniyu ledyanogo pokrova (Monitoring the status of lakes on the basis of radio thermal radiation), *Geografiya i prirodnye resursy*, 1994, No. 1, pp. 170–175.
5. Bordonskii G.S., Krylov S.D. O prirode kol'tsevykh obrazovaniy na sputnikovykh snimkakh ledyanogo pokrova ozera Baikal (About nature of ring formations on satellite images of Baikal ice cover), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 27–31.
6. Gurulev A.A., Krylov S.D. Ispol'zovanie radioteplovogo izlucheniya dlya kontrolya zagryazneniya del'ty reki Selengi (Use of radio thermal radiation for pollution control of Selenga River delta), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2004, No. 1, pp. 72–75.
7. Obolkina L.A., Bondarenko N.A., Doroshchenko L.F. O nakhodke kriofil'nogo soobshchestva v ozere Baikal (On finding cryophilic community in Lake Baikal), *DAN*, 2000, Vol. 371, No. 6, pp. 815–817.
8. Rodionova N.V., Filatov A.V., Evtyushkin A.V. Izmenenie teksturnykh parametrov ledyanogo pokrova yuzhnoi chasti ozera Baikal v period ledostava 2010 goda po radarnym dannym ALOS PALSAR (Lake Baikal ice cover texture features change during the freezing period 2010 by ALOS PALSAR data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 173–181.
9. Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova E.A., Tomberg I.V., Vishnyakov V.S., Mal'nik V.V. Massovoe razvitiye zelenykh nitchatykh vodoroslei rodov Spirogyra i Stigeoclonium (Chlorophyta) v pribrezhnoi zone Yuzhnogo Baikala (The massive development of green filamentous algae genera Spirogyra and Stigeoclonium (Chlorophyta) in the coastal area of Southern Baikal), *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 2014, Vol. 50, No. 5, pp. 15–26.
10. Ivanov A.Yu. Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images, *Int. J. Remote Sensing*, 2012, Vol. 33, No. 23, pp. 7579–7598.