Определение областей донного газоотделения на акваториях с пресным льдом по данным радарных и радиометрических измерений

Г.С. Бордонский, А.А. Гурулев, С.Д. Крылов, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов

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

В работе выполнено экспериментальное исследование возможности определения участков донного газоотделения на акваториях, покрытых пресным неподвижным льдом, с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой и приземных микроволновых радиометрических измерений при относительно слабом донном газоотделении. В качестве объекта исследования выбрано пресное эвтрофированное оз. Шакшинское группы Ивано-Арахлейских озер Забайкальского края, для которого ранее исследовали процессы накопления газов в ледяном покрове. В 1986-89 гг. для этого водоема выполнялись микроволновые радиометрические измерения и получено радиоизображение объекта с пространственным разрешением около 250 м на волнах сантиметрового диапазона. На этом радиоизображении выделялись участки повышения радиояркостной температуры, которые были связаны с накоплением газов на границе лед-вода.
В настоящем исследовании выполнен анализ изображений, полученных РСА COSMO-SkyMed (9 марта 2012 г.), и радиометрического изображения (27 марта 1989 г.), а также приземных радиометрических измерений с автомобиля на волне 2,3 см (март 2015 г.). Проведены прямые измерения концентрации газовых включений и их химического состава на выделенных при радиофизических измерениях участках льда. В качестве дополнительного источника информации использованы снимки поверхности ледяного покрова в ближнем ИК и видимом диапазонах для начальной стадии формирования льда.
Показана эффективность совместного радарного и радиометрического обнаружения задержанных льдом газовых включений при невысокой скорости их поступления в лед ~ 0,1 л/м^2 за сутки. Определен генезис газов во льду для данного озера, и сделан вывод о возможной регистрации участков накопления газа в весенний период при таянии льда не только по статическим структурам, но и при образовании особых структур – «пропарин», представляющих собой области открытой воды.

Ключевые слова: ледяной покров, газовые включения, РСА, микроволновая радиометрия

Одобрена к печати: 09.03.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161

Введение

Изучение газового дыхания Земли интересно для многих задач – поиска месторождений углеводородов, определения областей деструкции органического вещества и газогидратов, оценки климатических изменений (Бондур, Кузнецова, 2015; Шахова и др., 2009; Walter et al., 2006; Semiletov et al., 2004). Выделение газов исследуют как прямыми методами, так и с использованием дистанционных измерений. К прямым методам, кроме непосредственного отбора газов и их химического анализа, можно отнести лазерный метод определения состава газов по их спектральным характеристикам (Межерис, 1987). Недостатки прямых методов заключаются в их трудоемкости при обследовании больших площадей. В дистанционных методах используют локальные изменения электромагнитных свойств природной среды для определения областей газирования. Например, распространение газов через водную среду можно наблюдать по их выбросам с возникновением пенных образований на открытой водной поверхности. Пенные образования легко определяются при радиолокационных и оптических измерениях (Бондур, Кузнецова, 2015; Bulatov et al., 2003). Выходы газов на глубоководных участках морей можно обнаруживать при ИК-измерениях контрастов температуры поверхностного слоя воды, например, при его охлаждении из-за адиабатического расширения быстро поднимающихся из глу-

бин газовых пузырей (Кочек, 1984). Эти способы реализуемы при достаточно интенсивном локальном выделении газов.

В случае слабого газирования обнаружение выхода газов дистанционными методами затруднено. Однако газовые пузыри в природной среде могут создавать более сложные упорядоченные структуры. Например, в регионах с сезонными промерзанием земной поверхности возникают плотные поверхностные слои, задерживающие поднимающиеся вверх газы, это – мерзлые грунты и ледяные покровы. Вследствие эффекта накопления газов в мерзлых грунтах и ледяных покровах происходит изменение их радиофизических и оптических свойств, что может быть использовано для дистанционного определения газирующих объектов. В общем случае структурирование мерзлых объектов при наличии газовых включений может приводить к многомерным упорядоченным образованиям, определяемым характером конкретных диссипативных свойств системы (Хакен, 2015).

Этот эффект использовали в работах (Бордонский и др. 1985, 1992; Bordonsky et al., 1991), где был предложен метод поисков газирующих месторождений на акваториях по характеристикам пресного неподвижного ледяного покрова с использованием пассивной радиолокации. Пресный лед достаточно прозрачен в микроволновом диапазоне на длинах волн от 0,8 см до 30 см (скин-слой составляет значение от десятков сантиметров в коротковолновом участке до десятков метров в длинноволновом участке в зависимости от концентрации солей). Вследствие эффекта накопления газовых пузырей во льду в этом случае возможна регистрация относительно слабого донного газоотделения, которое практически невозможно наблюдать по пенным образованиям. Например, структурой, резко увеличивающей радиояркостную температуру, является тонкий слой (~1-3 мм) смеси газовых пузырьков небольших размеров на границе лед-вода (Бордонский и др., 1989). Он создает согласующий слой на длинах волн 2-5 см, что оказывается удобным для практической реализации способа с точки зрения как параметров существующих радиофизических систем, так и слабого затухания этих волн в атмосфере. Что касается оптических измерений, то они оказываются далеко не всегда эффективными из-за влияния атмосферы и низкой проникающей способности в снежный покров.

Предложенный в работах (Бордонский и др. 1985, 1992; Bordonsky et al., 1991) метод интересен для Арктики и Субарктики, где на всей территории происходит замерзание водоемов. Однако он не нашел до настоящего времени практического использования. Это связано, прежде всего, с низкой пространственной разрешающей способностью спутниковых радиометрических систем, которая составляет в сантиметровом диапазоне значение порядка десяти километров. При установке приборов на самолет разрешение улучшается, но падает оперативность съемки и возрастает ее стоимость в расчете на единицу обмеряемой площади. Имеются сложности и с интерпретацией радиометрических данных, т.к. в случае интенсивного и неравномерного выделения газа возникает многообразие излучательных свойств структуры льда с захваченными газами.

В настоящее время происходит быстрое развитие радиолокационных спутниковых систем с синтезированной апертурой. РСА достигли пространственного разрешения лучше одного метра. Поэтому представляется перспективным их использование для обнаружения газовых пузырей во льдах, а по ним – областей донного газоотделения. Эффект рассеяния микроволнового излучения на пустотах во льду широко используется для определения возрастных градаций льда и особенностей ледяных покровов в Арктике и Антарктиде (Радиолокация..., 1990; Helm et al., 2014; Тихонов и др., 2015). Радиометрические измерения с учетом рассеяния излучения на пустотах в ледяном покрове Антарктиды впервые были выполнены с борта КА «Космос – 243» (Башаринов и др.. 1974). Однако использование радиолокатора для регистрации газовых включений из космоса в пресном льду по сравнению с радиометрией имеет свои особенности (Бордонский и др., 2014). Рассеянный в обратном направлении сигнал может быть существенно ослаблен, если при том же удельном объеме газа в среде размеры газовых пузырьков во льду будут во много раз меньше длины волны излучения. Рассеяние также будет слабым от переходного слоя смеси мелких газовых пузырьков и воды на нижней гладкой границе льда и воды.

Представляется, что более эффективным для обнаружения газовых включений в ледяных покровах может быть совмещение активных и пассивных методов радиозондирования. Использование РСА в этом случае целесообразно для предварительного выделения областей при обследовании больших площадей, где возможно накопление газов во льду. К изучаемым объектам можно отнести ледяные покровы пресных озер, болот, водохранилищ, рек и их дельт, а также лед распресненных областей шельфовых зон вблизи впадения крупных рек. Выделенные области затем исследуются методами микроволновой радиометрии с разрешением порядка метра при установке приборов на самолеты или другие носители (вертолеты, дельталеты, беспилотные летательные аппараты, суда на воздушной подушке). Такой подход базируется как на сходстве текстуры изображений, получаемых при радарных и радиометрических измерениях, так и принципиальных различиях в их формировании двумя методами. Он позволяет получить близкое пространственное разрешение, что дает возможность сопоставить результаты измерений двумя методами и, используя различие их информативности, получить более достоверный результат о характеристиках объекта. Не исключается также, в благоприятных случаях, использование оптических изображений.

Цель настоящей работы – изучить возможность совместного использования спутниковых РСА и приземных микроволновых радиометрических изображений пресных ледяных покровов при близком пространственном разрешении порядка одного метра. Решить данную задачу в общем виде расчетными методами затруднительно, в том числе и из-за многообразия электрофизических свойств изучаемого объекта. Поэтому на первом этапе целесообразно экспериментально проверить предлагаемый подход на ранее исследованном объекте, для которого имеются данные о выделении газов и их захвате в лед, подтвержденные микроволновыми радиометрическими измерениями.

Эксперимент

Ранние измерения. Исследования радиофизических свойств ледяного покрова проводили для оз. Шакшинское, расположенного в Забайкальском крае. Это озеро пресное, неглубокое, эвтрофированное; имеет овальную форму, его размеры около 10×6 км. Ранее в 1986-89 гг. в зимний период времени были выполнены микроволновые радиометрические измерения ледяного покрова этого водоема при установке радиометров на самолет и автомобиль, и получено первое микроволновое изображение объекта в сантиметровом диапазоне с разрешением ~ 250 м (*рис. 1*). Выполненные исследования показали возможность регистрации донного газоотделения, связанного с деструкцией органических отложений. При исследовании впервые экспериментально была обнаружена структура в виде переходного слоя смеси воды и газа на нижней границе льда. При измерениях на длине волны 2,3 см обнаруженное приращение радиояркостной температуры составило 10 К при толщине льда 130 см. Максимальное приращение радиояркостной температуры, согласно расчетам для такой структуры, может достигать 30 К при толщине слоя смеси ~1 мм и концентрации газа в слое 50% (при температуре верхнего слоя льда -30˚С).

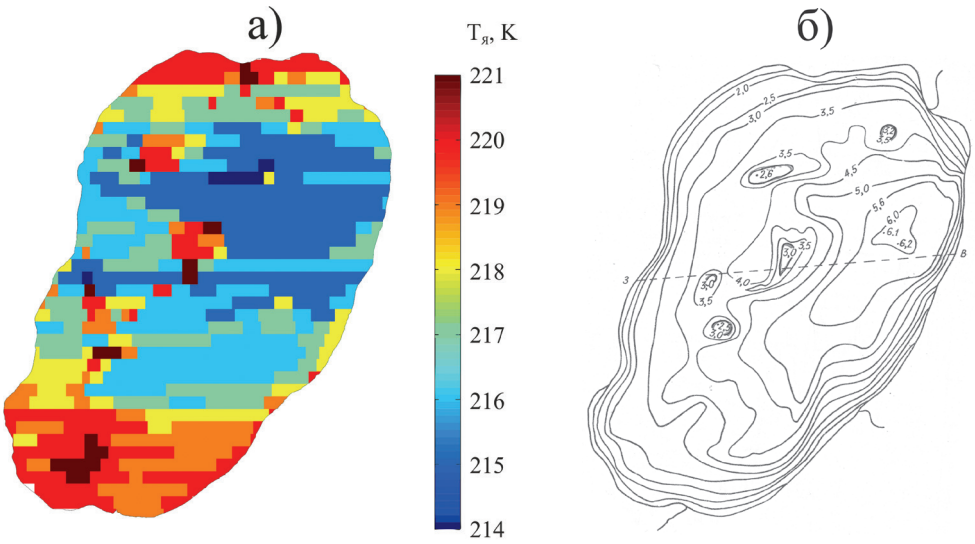

Рис. 1. а) Радиоизображение ледяного покрова оз. Шакшинское в условных цветах по микроволновым радиометрическим измерения на волне 2,3 см с борта самолета АН-2 в декабре 1989 г. б) Батиметрическая карта озера

В последние годы было получено радиоизображение озера Шакшинское с использованием РСА COSMO-SkyMed на длине волны 3 см с разрешением 3 м, (в марте 2012 г. – *рис. 2*). Поэтому оказалось возможным сравнить радиометрическое изображение на волне 2,3 см (с разрешением ~ 250 м), полученном при самолетной съемке в 1989 г. и радарное изображение 2012 г. Исходя из предположения, что интенсивность донного газоотделения относительно стабильна в разные годы по площади дна озера, были выделены три участка, которые на снимках РСА представлялись как области с повышенным содержанием газов в ледяном покрове. На изображении *рис. 2* эти участки обозначены <1>, <2> и <3>.

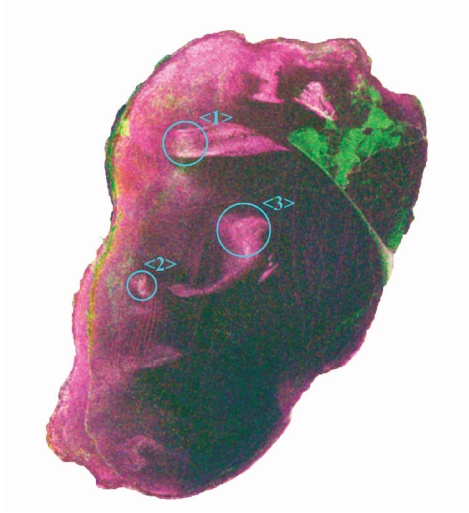

Рис. 2. Радарное изображение ледяного покрова оз. Шакшинское. COSMO-SkyMed λ=3 см. Март 2012 г. (синтезир. HH+VH, снимок предоставлен компаниями «Совзонд» и «E-GEOS» по лицензии Итальянского космического агентства (ASI)). Выделены области <1>, <2>, <3>, совпадающие с ростом радиояркости – рис. 1

Оказалось, что имеются совпадения усиления рассеяния и возрастании радиояркости на двух изображениях. При трассовых измерениях при помощи радиометра, установленного на автомобиль, на участке <3> *рис. 2* в ранних измерениях обнаружено возрастание радиояркостной температуры ($T_я$), связанное с накоплением газа на нижней границе льда (*рис. 3*). Существование такой структуры было подтверждено специальными экспериментами (Бордонский и др., 1989). Однако существенный временной сдвиг в получении радарного и радиометрического изображений (1989 и 2012 гг.), а также различие в пространственном разрешении двух изображений не позволяют достоверно верифицировать предлагаемый способ обнаружения донного газоотделения. Кроме того, на радарном изображении наблюдались и другие многообразные структурные особенности. Поэтому в зимний период 2014-15 гг. было решено провести радиометрические измерения с разрешением порядка одного метра, при установке аппаратуры на автомобиль, по определенным выделенным трассам на ледяном покрове оз. Шакшинское.

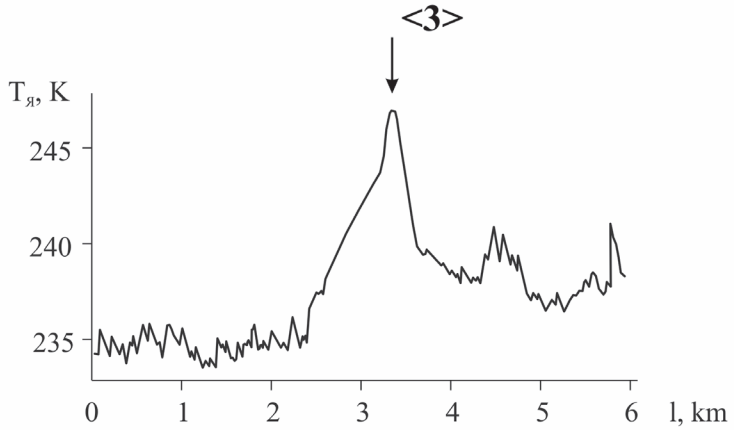

Рис. 3. Результаты трассовых измерений радиояркостной температуры на длине волны 2,3 см при пересечении участка <3> при измерениях в 1989 г. и движении по трассе с востока на запад. Угол наблюдения 30° на вертикальной поляризации

Измерения 2015 г. Забайкальский край характеризуется низким уровнем осадков и облачных образований. Это позволило получить дополнительную информацию о ледяном покрове в начальный период формирования льда в ИК и видимом диапазонах, когда снежный покров практически отсутствует.

На *рис. 4а* показан космоснимок оз. Шакшинское за 7 ноября 2015 г., полученный с помощью аппаратуры КШМСА-ВР в диапазоне длин волн 0,8 -0,9 мкм, установленной на космическом аппарате «Ресурс-П», в период формирования льда при отсутствии снежного покрова. На *рис. 4б* приведен снимок данного водоема, выполненный годом ранее в ноябре 2014 г. с борта пассажирского самолета в видимом диапазоне. На данных снимках ледяного покрова были также отмечены два участка (<1>, <2>), которые выделялись на радарном изображении как участки с повышенным обратным рассеянием. Эти же области, как отмечено выше, выделялись на радиометрическом изображении 1989 г., полученном с самолета, повышенным значением радиояркостной температуры. Однако на снимках (*рис. 4*) не выделялся участок <3>, хорошо заметный на радиоизображениях. Эта особенность связывается с тем, что изображения на *рис. 4* представляют состояние поверхностных слоев ледяного покрова. По-видимому, на участке <3> газоотделение в начальный период формирования льда относительно слабое.

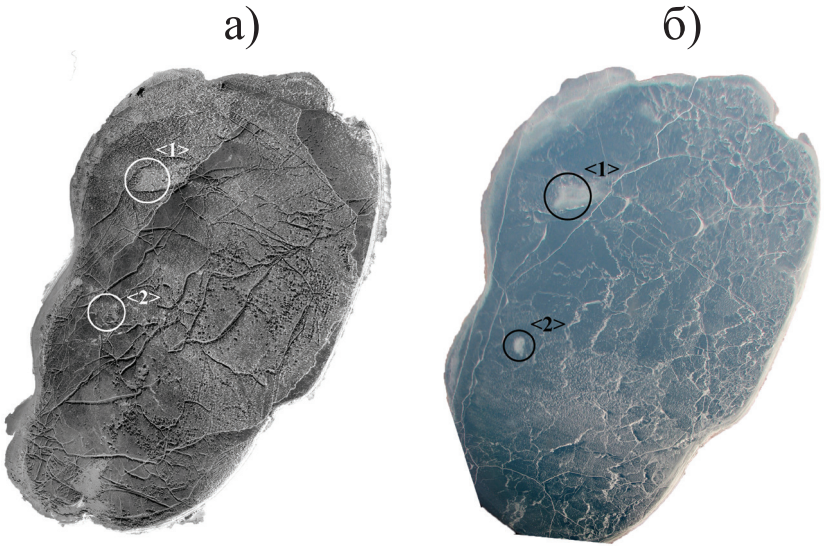

Рис. 4. Изображения оз. Шакшинское: а) 7 ноября 2015 г., полученное с помощью аппаратуры КШМСА-ВР в диапазоне длин волн 0,8 – 0,9 мкм, установленной на космическом аппарате «Ресурс-П»; б) фотография, полученная с борта пассажирского самолета 12 ноября 2014 г. Выделены области, где были повышены радиояркость (рис. 1) и интенсивность обратного рассеяния (рис. 2)

Непосредственные измерения на льду озера выполнялись в марте и декабре 2015 г. В марте 2015 г. выполнены измерения радиояркостной температуры с использованием радиометра на волну 2,3 см и проезда по трассе через области <1>, <2> и <3>, выделенные на *рис. 2, 4*. На *рис. 5* представлены результаты измерения радиояркостной температуры при движении радиометра через области <1> и <2>. Одновременно исследовали структуру льда, брали пробы газа, вмороженного в ледяной покров. Повторное измерений состава газа проведено в декабре 2015 г. в области <1>.

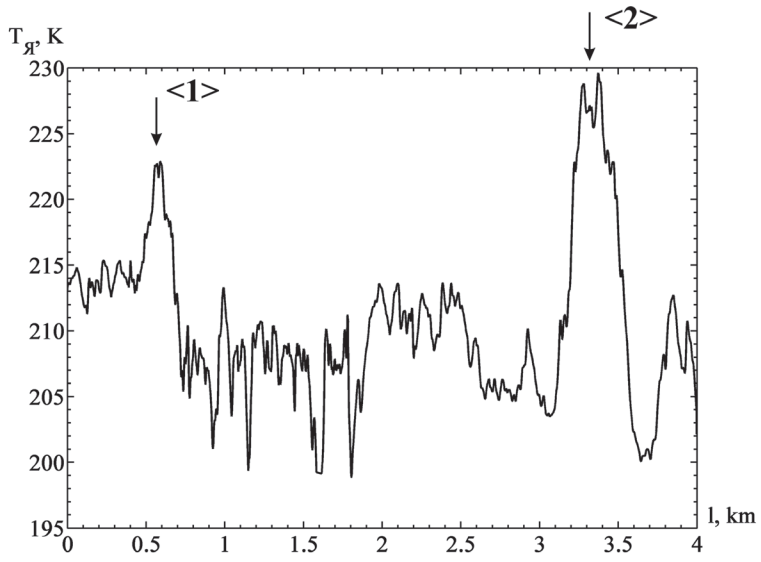

Рис. 5. Трассовые измерения радиояркостной температуры ледяного покрова оз. Шакшинское, через области <1>, <2> на длине волны 2,3 см. 13 марта 2015 г.

Как следует из *рис. 5*, в областях <1>, <2> наблюдалось заметное приращение радиояркостной температуры, превышающее 10 К. Толщина снежного покрова в этой части озера достигала 15 см, но отдельные участки льда были оголены. Поэтому наблюдали существенные вариации радиояркостной температуры из-за эффектов рассеяния.

Изучение областей льда с повышенной радиояркостью показало наличие на этих участках крупных газовых пузырей, которые визуально наблюдали в виде тонких (~1 см толщины) плоских скоплений белого цвета с горизонтальными размерами от единиц до десятков сантиметров (*рис. 6*). Белый цвет определяется мелкими кристалликами льда в полости, которые появляются в процессе метаморфизма пузырей из-за испарения льда и конденсации пара в полости при суточных колебаниях температуры среды.

Рис. 6. Снимок участка льда в области <1> с газовыми включениями на оз. Шакшинское. Март 2015 г.

Измерение объемной концентрации газов во льду в четырех различных областях (четвертая область имела визуально чистый лед) выявило следующие особенности. Концентрация газов на участках <1>, <2> и <3> достигала 1-2%, что приблизительно соответствует интенсивности поступления газа в лед в течении зимы ~0,1 л/м^2 в сутки. Было выполнено хромотографическое исследование основных газовых компонент из отобранных кернов льда. Их объемное содержание по измерениям в марте 2015 г. было близким к атмосферному для азота и кислорода, с повышенным содержанием углекислого газа до 0,3% и наличием метана ~0,1%. В декабре 2015 г. содержание метана составляло 1%. Содержание этого газа в исследованиях (Тополов, 1991) при отборе газа в ловушки на озерах Ивано-Арахлейской системы, где расположено оз. Шакшинское, составляло обычно значение от единиц до десятков процентов. Можно предположить, что содержание метана в пузырях, где находится значительное количество кислорода, уменьшается со временем из-за его окисления. Содержание тяжелых углеводородов не превышало 0,001%, водорода – 0,01%. В области ледяного покрова, где отсутствовали аномалии на радиоизображениях, общая концентрация газов в кернах льда не превышала 0,1%.

Из анализа состава газов, захваченных в лед, следует, что их генезис в областях повышенной концентрации определяется двумя процессами. Первый – деструкция донных органических отложений (белков и углеводов), при которых характерно выделение метана, кислорода, азота, углекислого газа и водорода. По данным (Тополов, 1991), при некоторых условиях возможны высокие значения объемной концентрации азота и кислорода, соответствующие земной атомосфере. Второй процесс – выделение растворенных в воде атмосферных газов, предположительно из-за локального подогрева воды в донной части некоторых областей озера. Действительно, на карте глубин водоема (*рис. 1б*) имеется характерная неоднородность рельефа дна в виде локальных поднятий поверхности на 1-2 м с горизонтальными размерами порядка ста метров. Средние глубины озера – 3-5 м. В конце марта 2015 г. при исследовании ледяного покрова над таким участком на данном озере была обнаружена купольная структура с размерами ~ 400 м, для которой толщина льда в центре была на 5 см меньше, чем на периферии (Гурулев и др., 2015). Причем вблизи центральной части был обнаружен канал, по которому в центр купольной структуры поступали газовые пузыри. Из-за отсутствия снежного покрова на части льда удалось проследить канал на расстоянии до 100 м. Интересно, что в центре этого образования, куда поступал газ, находилась особого вида полынья, которая называется «пропариной» – структурным образованием, известным на оз. Байкал. Отличие пропарины от обычной полыньи заключается в том, что пропарина образуется после установления ледяного покрова (Гляциологический словарь, 1984). До настоящего времени точный механизм образования пропарин не изучен. Считается, что пропарины образуются как под влиянием донного газоотделения, так и подледных течений (Гранин, Гранина, 2002; Ivanov, 2012). Нами в (Гурулев и др., 2015) высказано предположение, что пропарины возникают при накоплении газов в определенных участках (купольных структурных) и возникновении интенсивного локального вертикального перемешивания воды на участках с размерами порядка 1-10 м. Такие процессы для пограничных слоев исследованы в (Zilitinkevich, 2015). Они отличаются от ранее известных неустойчивостей тече-

ний на границах сред тем, что на первом этапе развития неустойчивости возникают вихри малых размеров, которые далее объединяются в более крупные вихревые структуры.

Обсуждение полученных результатов

1. Методы дистанционного зондирования позволяют регистрировать газовое дыхание Земли на акваториях по контрастам электрофизических и структурных особенностей приповерхностных водных слоев. Интенсивное газоотделение можно регистрировать по пенным образованиям при выходе пузырей газа на открытую водную поверхность с использованием активной и пассивной радиолокации (Бондур, Кузнецова, 2015; Bulatov et al., 2003).

В случае слабо выраженного выхода газов (на уровне 0,1-1 л/м^2 в сутки) и отсутствии пенных образований возможно обнаружение газов по специальной методике, основанной на регистрации их накопления в ледяных покровах, что может происходить в зимнее время в холодных областях планеты. Этот способ наиболее эффективен при зондировании пресных ледяных покровов из-за высокой проникающей способности микроволнового излучения в пресный лед и сухой снежной покров.

2. В настоящей работе рассмотрено совместное использование РСА и микроволновой радиометрии для определения областей газирования подо льдами. Радарное изображение позволяет исследовать текстуру изображений и выделять области предполагаемой повышенной концентрации рассеивателей в виде газовых пузырей, захваченных в лед. При этом радар выявляет и другие рассеивающие излучение объекты, например, захваченные в лед фрагменты высшей водной растительности, участки разрушенного льда и повышенной шероховатости поверхности, результаты хозяйственной деятельности и т.д. Поэтому для их идентификации требуется дополнительная информация, которая может быть получена при пассивных микроволновых измерениях с близким пространственным разрешением. Оптические изображения также могут быть полезны в некоторых случаях для дешифровки изображений (в начальный период формирования ледяного покрова при отсутствии снежного покрова).

Предложенный метод был экспериментально проверен на неглубоком эвтрофированном озере. С использованием измерений на длинах волн 2-3 см показана возможность реализации метода для определения участков повышенного содержания газовых включений в пресном льду. Таким образом, первым этапом решения поисковой задачи является определение областей локализации газов во льду по последовательным радарным и радиометрическим измерениям. Второй этап – прямые измерения при отборе проб и выяснение генезиса газов на основе всех полученных данных.

3. На оз. Шакшинском при изучении генезиса газов в ледяном покрове оказалось, что их происхождение связано с двумя процессами: деструкцией донных органических отложений и выделением растворенных в воде атмосферных газов в областях, где увеличен

приток тепла со дна водоема. Последняя особенность определяется рельефом дна с характерными для данного озера областями возвышений, следовательно, со спецификой геологической структуры объекта.

Особенности рельефа дна неглубоких водоемов могут проявиться в конце периода существования ледяного покрова, когда начинается процесс таяния нижней его границы, высвобождение вмороженных газов и их миграции в купольные структуры (области с относительно меньшей толщиной льда). Из-за появления течений, создаваемых мигрирующими газами, возникновения каналов во льду и накопления газов в локальных структурах могут возникать дополнительные текстурные признаки на радиоизображениях. Они также могут быть использованы для обнаружения областей скопления газов. В частности, на исследуемом водоеме был обнаружен небольшой открытый участок воды, образовавшийсяв ледяном покрове в конце периода ледостава (пропарина). Пропарины известны на оз. Байкал, и их связывают с донным газоотделением. Предполагается, что они возникают из-за локальной неустойчивости водной среды с возникновением вихревых течений. Имеются их описания в виде появления отдельных гнезд в ледяном покрове с последующим их слиянием в крупное образование открытой воды (Гранин, Гранина, 2002). Такие, особого вида, структуры могут быть использованы для поисков объектов газирования в случае акваторий морей, где затруднено радиолокационное изучение внутренней структуры соленых льдов.

Литература

1. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
2. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30-43.
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., Кренделев Ф.П., Поляков С.В.* Газовые включения в озерных льдах и радиояркостная температура ледяного покрова // Геология и геофизика. 1985. Т. 26. № 9. С. 66–73.
5. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Поляков С.В.* Особенности радиотеплового излучения пресноводного ледяного покрова с переходным слоем на границе вода-лед // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 4. С. 396–401.
6. *Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Поляков С.В.* Особенности радиояркости пресного ледяного покрова, содержащего газовые включения // Исследование Земли из космоса. 1992. № 5. С. 13–21.
7. Гляциологический словарь. Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 528 с.
8. *Гранин Н.Г., Гранина Л.З.* Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 629–637.
9. *Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В.* Изучение структуры пропарин во льду методом микроволновой радиометрии // Материалы Тринадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 2015. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2015/e/gurulev.pdf.
10. *Кочек Б.* Применение методов дистанционного зондирования при поисках нефти в Северной Адриатике // Дистанционное зондирование. Докл. 27 Международного геологического конгресса. Секция С 18. М. 1984. С. 45–55.
11. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
12. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Ред. Л.М. Митник, С.В. Викторов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 200 с.
13. *Тихонов В.В., Репина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.* Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93.
14. *Тополов А.А.* Донное газообразование в озерах Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1991. 78 с.
15. *Хакен Г.* Синергетика Ч.1, 2. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2015. 880 с.
16. *Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79. № 6. С. 507–518.

17. *Bordonsky G.S., Krylov S.D., Polvakov S.V.* Brightness temperature of fresh-water ice cover on the region with bottom's gas liberation // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91). Helsinki. 1991. V. 3. P. 1577–1579.
18. *Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Raev M.D., Pungin V.G., Skvortsov E.I.* Microwave Radiation and Backscatter of the Sea Surface Perturbed by Underwater Gas Bubble Flow // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03). Toulouse. France. July 21–25. 2003. P. 2668–2670.
19. *Helm V., Humbert A., Miller H.* Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2 // The Cryosphere. 2014. V. 8. P. 1539–1559.
20. *Ivanov A.Yu.* Unique phenomena in Lake Baikal, Russia imaged and studied with SAR and multi-sensor images // Int. J. Remote Sensing. 2012. V. 33. Iss. 23. P. 7579–7598.
21. *Semiletov I., Makshtas A., Akasofu S., Andreas E.L.* Atmospheric CO2 balance: The role of Arctic sea ice // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L05121. P. 1–4.
22. *Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin III F.S.* Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // Nature. 2006. V. 443. 7 September. P. 71–75.
23. *Zilitinkevich S.S.* Why turbulence dominates the atmosphere and hydrosphere? Proc. Int. Conf. "Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere". V.P. Melnikov, D.S. Drozdov (Eds.). Tyumen: Epoha Publishing House, 2015. P. 138–141.

Determination of bottom gas liberation zones in fresh ice water areas according to radar and radiometric measurements data

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

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Chita, 672014, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru

The paper presents an experimental investigation of possibility of determining the zones of bottom gas liberation in water areas covered with fresh fast ice, using synthetic-aperture radar and surface microwave radiometric measurements under the conditions of rather weak bottom gas liberation. The object of research was a fresh eutrophicated Lake Shakshinskoye, one of the Ivan-Arakhley Lakes in Zabaikalsky krai, for which the processes of gas accumulation in ice cover had been studied before. In 1986-1989, microwave radiometric measurements for this reservoir were carried out and a radio image of the object at about 250 m spatial resolution in centimeter wave range was received. This radio image showed the areas with increased brightness temperature which were associated with accumulation of gases on ice-water border.
The present study analyzes the images received by SAR COSMO-SkyMed (March 9, 2012) and the radiometric image (March 27, 1989), as well as surface radiometric measurements from a car at 2.3 cm wavelength (March, 2015). Direct measurements of occluded gases concentration and their chemical composition in the ice areas based on radio physical measurements were performed. As an additional source of information, pictures of the ice cover surface in the near IR and visible bands for initial stage of ice formation were used.
We showed efficiency of joint radar and radiometric detection of occluded gases kept by ice at a low speed of their entry into ice ~ 0.1 l/m2 per day. Genesis of ice gases for this lake was determined and we made a conclusion on possible registration of gas accumulation areas during the spring period and ice melting not only based on static structures, but also during formation of specific structures, ice streamthroughs, representing areas of open water.

Keywords: ice cover, occluded gases, SAR, microwave radiometry

Accepted: 09.03.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-150-161

References

1. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (Earth Radio Radiation as Planets), Moscow: Nauka, 1974, 188 p.
2. Bondur V.G., Kuznetsova T.V. Vyyavlenie gazovykh sipov v akvatoriyakh arkticheskikh morei s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 4, pp. 30–43.
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., Krendelev F.P., Polyakov S.V., Gazovye vklyucheniya v ozernykh l'dakh i radioyarkostnaya temperatura ledyanogo pokrova (Gaseous Inclusions in Lake Ices and the Radio Brightness Temperature of Ice Cover), *Geologiya i geofizika*, 1985, Vol. 26, No. 9, pp. 66–73.
5. Bordonskii G.S., Krylov S.D., Polyakov S.V., Osobennosti radioteplovogo izlucheniya presnovodnogo ledyanogo pokrova s perekhodnym sloem na granitse voda-led (Features of a Thermal Radio Radiation of a Fresh-Water Ice Cover with the Transition Layer on Border Water-Ice), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 1989, Vol. 25, No. 4. pp. 396–401.
6. Bordonskii G.S., Krylov S.D., Polyakov S.V., Osobennosti radioyarkosti presnogo ledyanogo pokrova, soderzhashchego gazovye vklyucheniya (Features of Radio Brightness of the Fresh Ice Cover Containing Gaseous Inclusions), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1992, No. 5, pp. 13–21.
7. *Glyatsiologicheskii slovar'* (Glaciological dictionary), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 528 p.
8. Granin N.G., Granina L.Z., Gazovye gidraty i vykhody gazov na Baikale (Gas Hydrates and Gas Venting on Baikal), *Geologiya i geofizika*, 2002, Vol. 43, No. 7, pp. 629–637.
9. Gurulev A.A., Krylov S.D., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V., Izuchenie struktury proparin vo l'du metodom mikrovolnovoi radiometrii (The study of ice streamthroughs structure by microwave radiometry), *Proc. 13th Conf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Current problems in remote sensing of the Earth from space), Moscow, 2015, URL:http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2015/e/gurulev.pdf.
10. Kochek B., Primenenie metodov distantsionnogo zondirovaniya pri poiskakh nefti v Severnoi Adriatike (Application of Methods of Remote Sensing by Searches of Oil in Northern Adriatic Sea), *Distantsionnoe zondirovanie. Dokl. 27 Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa. Sektsiya S 18* (Remote Sensing. Proc. 27 International Geological Congress. Section C 18), Moscow, 1984, pp. 45–55.
11. Mezheris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie* (Laser Remote Sensing), Moscow: Mir, 1987, 550 p.
12. *Radiolokatsiya poverkhnosti Zemli iz kosmosa* (Radar sensing of the Earth surface from Space), L.M. Mitnik, S.V. Viktorova (Eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 200 p.
13. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., Kompleksnyi algoritm opredeleniya ledovykh uslovii v polyarnykh regionakh po dannym sputnikovoi mikrovolnovoi radiometrii (VASIA2) (An Integrative Algorithm for Ice Conditions Determination in Polar Regions from Satellite Microwave Radiometry (VASIA2)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 2, pp. 78–93.
14. Topolov A.A., *Donnoe gazoobrazovanie v ozerakh Zabaikal'ya* (Bottom Gassing in Lakes of Transbaikalia), Novosibirsk: Nauka, 1991, 78 p.
15. Haken H., Sinergetika (Synergetics), Moscow: URSS: LENAND, 2015, 880 p.
16. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P., Vklad Vostochno-Sibirskogo shel'fa v sovremennyi tsikl metana (Contribution of the East Siberian Shelf to the Modern Cycle of a Methane), *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, Vol. 79, No. 6, pp. 507–518.
17. Bordonsky G.S., Krvlov S.D., Polvakov S.V., Brightness temperature of fresh-water ice cover on the region with bottom's gas liberation, *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91)*, Helsinki, 1991, Vol. 3, pp. 1577–1579.
18. Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Raev M.D., Pungin V.G., Skvortsov E.I., Microwave Radiation and Backscatter of the Sea Surface Perturbed by Underwater Gas Bubble Flow, *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03)*, Toulouse, France, July 21–25, 2003, pp. 2668–2670.
19. Helm V., Humbert A., Miller H., Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2, *The Cryosphere*, 2014, Vol. 8, pp. 1539–1559.
20. 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.
21. Semiletov I., Makshtas A., Akasofu S., Andreas E.L., Atmospheric CO2 balance: The role of Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett.,* 2004, Vol. 31, L05121, pp. 1–4.
22. Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin III F.S., Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming, *Nature,* 2006, Vol. 443, 7 September, pp. 71–75.
23. Zilitinkevich S.S., Why turbulence dominates the atmosphere and hydrosphere? *Proc. Int. Conf. "Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere"*, Tyumen: Epoha Publishing House, 2015, pp. 138–141.