

Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледовым покровом

И.В. Хвостов¹, А.Н. Романов¹, В.В. Тихонов^{2,3}, Е.А. Шарков²

¹*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
E-mails: khvostov.iwep@gmail.com, romanov_alt@mail.ru*

²*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mails: vasvlatikh@gmail.com, e.sharkov@mail.ru*

³*Московский физико-технический институт (государственный университет)
Москва, 141701, Россия*

Исследованы сезонные вариации яркостных температур акваторий крупных пресноводных озер по данным спутниковой микроволновой радиометрии на примере озер Байкал, Ладожское (РФ), Гурон (США-Канада). Установлены три характерных области. Первая область связана с излучением свободной ото льда водной поверхности, вторая — с установившимся сплошным ледяным покровом. В период таяния ледяного покрова зафиксировано кратковременное резкое возрастание яркостных температур на 40–90 К (третья область). Возникновение данного эффекта связано с изменением физических свойств льда при его разрушении и таянии, что вызывает повышение яркостной температуры ледяного покрова и экранирование микроволнового излучения, идущего от водной поверхности. Сделанные выводы подтверждаются модельными расчетами. Обнаруженная особенность позволяет предсказывать весеннее изменение ледовой обстановки крупных пресноводных акваторий по спутниковым данным.

Ключевые слова: микроволновое излучение, пресноводные озера, спутник SMOS

Одобрена к печати: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-149-154

Сезонный ледовый покров, образующийся на пресноводных водоемах в умеренных и высоких широтах, играет важную роль во многих атмосферных и гидросферных процессах, влияющих на региональные климатические особенности региона. Для изучения озерного льда применяются методы спутниковой альтиметрии и радиометрии. Спутниковые данные микроволнового зондирования используются для определения конкретных дат ледовых событий, включая первое появление льда, формирование стабильного ледяного покрова, первое появление открытой воды и полное исчезновение льда (Kougaev et al., 2007).

Для оценки толщины льда разработан алгоритм, основанный на использовании данных спутникового радиометра AMSR-E. Исследованы временные вариации яркостной температуры на частоте 18,7 ГГц. Показана возможность определения времени ледостава и ледохода по данным дистанционного зондирования (Kang et al., 2014). Осуществляется также дистанционная оценка толщины пресноводного льда по данным спутникового зондирования в X- и Ku-диапазонах при углах зондирования от 0 до 60° (Gunn et al., 2015).

По данным радиолокационного (Radarsat 2) и радиометрического (MODIS) зондирования возможно определение начала образования речного льда с погрешностью 2-3 дня (Chu, Lindenschmidt, 2016). Оценено влияние пресноводных озер на яркостную температуру, измеренную в зимний период радиометром AMSR-E (Lemmetyinen et al., 2011).

В данной работе приведены результаты сезонных вариаций яркостных температур, измеренных радиометром MIRAS, установленным на спутнике SMOS, на вертикальной

и волнением. Скорость ветра в этот период часто бывает 15–25 м/с, а высота волн достигает 5–8 м. Волнение иногда принимает беспорядочный характер, превращаясь в «толчею», при которой высокие крутые волны перемещаются в различных направлениях (Tikhonov et al., 2014). Для озера Гурон, которое никогда не замерзает полностью (Румянцев, Драбкова, Измайлова, 2012), а в 2012–2013 гг. было практически свободно ото льда, за исключением заливов и береговой линии (см. ссылки выше на сайт NOAA), данная область прослеживается по всему периоду спутниковых наблюдений и подтверждается модельными расчетами (рис. 2в). Здесь ход яркостной температуры определяется температурой водной поверхности и волнением, зависящим от скорости ветра, которая за весь период не превышала 10 м/с (см. ссылки выше на сайт NOAA).

Вторая область яркостных температур на рис. 2а, б связана с установившимся ледяным покровом. Для озера Байкал эта область соответствует периоду с января по апрель, а для Ладожского озера — с февраля по апрель. Здесь первоначально происходит резкое повышение яркостной температуры на 30–60 К, в зависимости от поляризации излучения. Оно связано с появлением сплошного ледяного покрова. Далее происходит постепенное возрастание яркостной температуры на величину порядка 10 К. Оно объясняется увеличением толщины ледяного покрова, которое для озера Байкал достигает 100–140 см, а для Ладожского озера — 40–60 см (Байкал..., 2008; Галазия, 1984; Ладожское..., 2015; Румянцев, Драбкова, Измайлова, 2012). Осцилляции яркостной температуры в этой области объясняются интерференционной картиной, возникающей при отражении излучения от верхней и нижней границы ледяного покрова. Лед в этот период характеризуется низкими диэлектрическими потерями — практически без трещин и влаги. Глубина формирования излучения в диапазоне 21 см значительно превосходит толщину льда (Tikhonov et al., 2014), и ледяной покров выступает в качестве дополнительного излучающего слоя к излучению водной поверхности, что полностью подтверждается модельными расчетами (рис. 2а, б). В данном случае изменение яркостной температуры может быть связано со скоростью нарастания льда и использовано как дистанционный критерий оценки погодных условий (суровость зимы) региона.

Третья область на рис. 2а, б, характеризующаяся кратковременным резким возрастанием яркостной температуры на 40–90 К, соответствует периоду кардинального изменения в структуре ледяного покрова (период интенсивного таяния). Возникновение данного эффекта связано с изменением физических свойств льда при его разрушении (появлении большого количества трещин) и таянии (насыщение трещин жидкой водой). Появление трещин и воды во льду изменяет его диэлектрические свойства — сильно увеличивается поглощение электромагнитного излучения, что вызывает повышение яркостной температуры ледяного покрова и экранирование микроволнового излучения, идущего от водной поверхности. Для озера Байкал эта область соответствует периоду с начала апреля по май, а для Ладожского озера — двухнедельному периоду в апреле (рис. 2а, б). Этот вывод полностью подтверждается теоретическими расчетами, а также региональными климатическими и гляциологическими особенностями данного периода (Байкал..., 2008; Галазия,

1984; Ладожское..., 2015; Румянцев, Драбкова, Измайлова, 2012). Начало таких изменений яркостной температуры может быть применено при уточнении сроков использования ледовых переправ, зимников, так как, начиная с этого периода, лед становится ненадежным и не может служить в качестве естественной переправы через водные объекты (реки, озера).

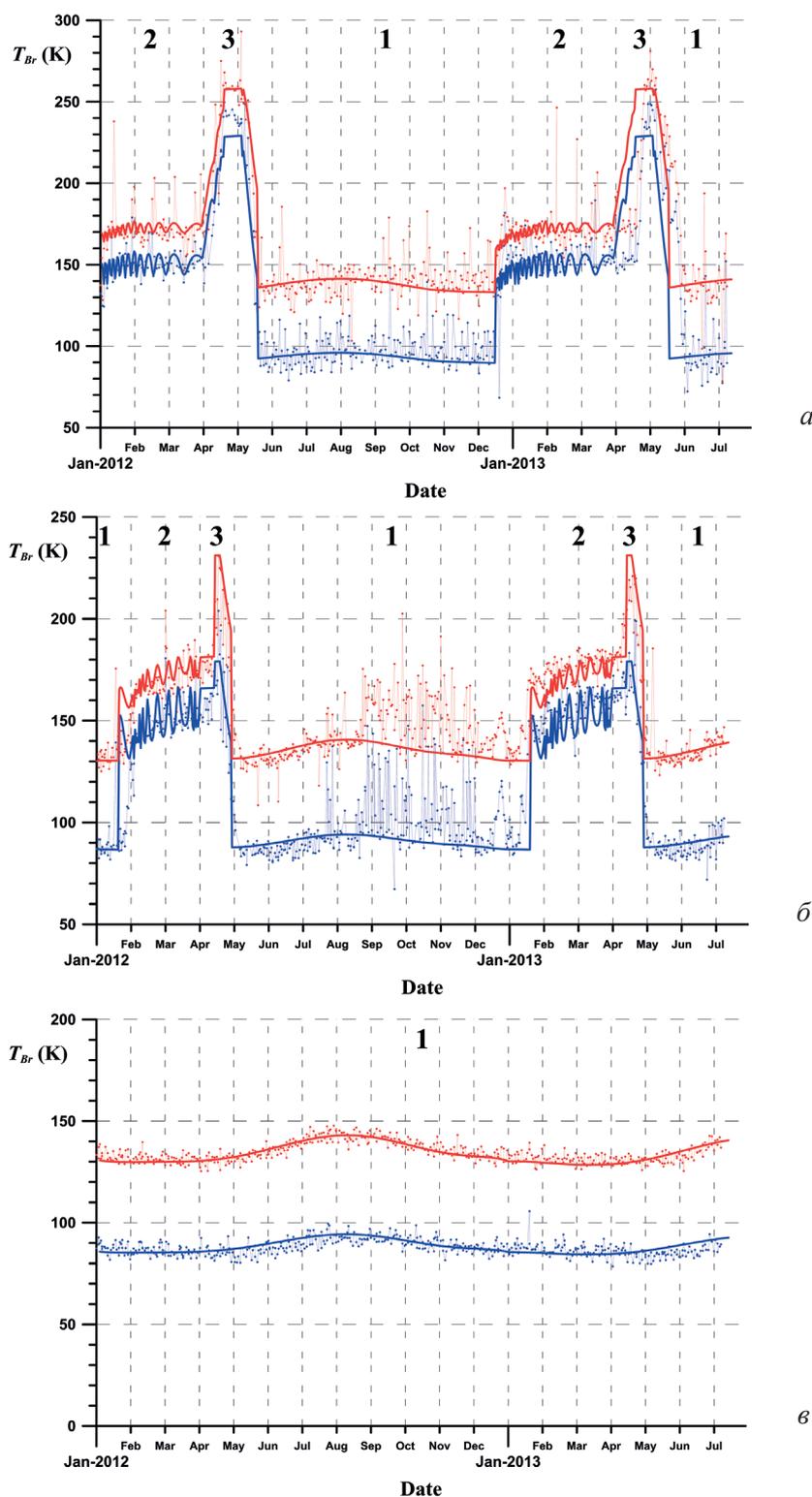


Рис. 2. Сезонные вариации яркостных температур участков озёр: Байкал (а), Ладожское (б), Гурон (в). Тонкие линии и символы — данные SMOS, толстые линии — результаты модельного расчёта. Красный цвет — вертикальная поляризация, синий — горизонтальная поляризация. Цифрами обозначены характерные временные области (см. пояснения в тексте)

Установленные закономерности сезонных вариаций яркостных температур могут быть использованы для оценки гидрологических режимов замерзающих внутренних водоемов (озер, искусственных водохранилищ) по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

Данные SMOS получены в рамках проекта ESA No. 4747 “Remote mapping of Siberian saline soils”. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-05018).

Литература

1. Байкал: природа и люди: Энциклопедический справочник / под ред. Тулохонова А.К. Улан-Удэ: «Изд. дом ЭКОС», 2008. 600 с.
2. Галазия Г. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1984. 368 с.
3. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья: Атлас / под ред. Румянцев В.А. СПб: Нестор-История, 2015. 200 с.
4. Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб: Лема, 2012. 370 с.
5. Chu T., Lindenschmidt K-E. Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 181. P. 65–81.
6. Gunn G.E., Duguay C.R., Brown L.C., King J., Atwood D., Kasurak A. Freshwater lake ice thickness derived using surface-based X- and Ku-band FMCW scatterometers // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 120. P. 115–126.
7. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14. 2014. 80 p. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models.
8. Kang K.-K., Duguay C.R., Lemmetyinen J., Gel Y. Estimation of ice thickness on large northern lakes from AMSR-E brightness temperature measurements // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 150. P. 1–19.
9. Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Légresy B., Remy F. Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 108. Issue 3. P. 240–253.
10. Lemmetyinen J., Kontu A., Kärnä J-P., Vehviläinen J., Takala M., Pulliainen J. Correcting for the influence of frozen lakes in satellite microwave radiometer observations through application of a microwave emission model // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. Issue 12. P. 3695–3706.
11. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid System // Cartography and Geographic Information Science. 2010. No. 30. P. 121–134.
12. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // Progress in Electromagnetics Research B. 2014. Vol. 59. P. 123–133.

Some features of L-band thermal radiation of freshwater bodies with ice cover

I.V. Khvostov¹, A.N. Romanov¹, V.V. Tikhonov^{2,3}, E.A. Sharkov²

¹ *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia*

E-mails: khvostov.iwep@gmail.com, romanov_alt@mail.ru

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

E-mails: vasvlatikh@gmail.com, e.sharkov@mail.ru

³ *Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow 141701, Russia*

By the examples of the lakes Baikal, Ladoga (Russia) and Huron (USA-Canada), temporal variations of brightness temperature of large freshwater lakes were explored based on satellite microwave radiometry data. Three characteristic brightness temperature regions were revealed. The first area is associated with ice-free water surface, the second with stable ice cover on the surface. In the third region, typical of the period of ice melting, a short-term sharp increase

in brightness temperature by 40–90 K was noted. This effect is associated with the change in physical properties of ice during destruction and melting, causing an increase in brightness temperature of the ice cover and screening of microwave radiation coming from the water surface. The conclusions are confirmed by model calculations. The detected effect allows predicting the spring change in the ice situation of large freshwater areas based on satellite data.

Keywords: microwave radiation, freshwater lakes, SMOS mission

Accepted: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-149-154

References

1. *Baikal: priroda i lyudi* (Baikal: Nature and people), Ulan-Ude: Izdatel'skii dom EKOS, 2008, 600 p.
2. Galaziya G., *Baikal v voprosakh i otvetakh* (Baikal in questions and answers), Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1984, 368 p.
3. Rumyantsev V.A., *Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya* (Lake Ladoga and the sights of its coast), Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015, 200 p.
4. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V., *Velikie ozera mira* (Great Lakes of the World), Saint-Petersburg: Lema, 2012, 370 p.
5. Chu T., Lindenschmidt K-E., Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 181, pp. 65–81.
6. Gunn G.E., Duguay C.R., Brown L.C., King J., Atwood D., Kasurak A., Freshwater lake ice thickness derived using surface-based X- and Ku-band FMCW scatterometers, *Cold Regions Science and Technology*, 2015, Vol. 120, pp. 115–126.
7. Gutierrez A., Castro R., Vieira P., *SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14*, 2014, 80 p., available at: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models.
8. Kang K.-K., Duguay C.R., Lemmetyinen J., Gel Y., Estimation of ice thickness on large northern lakes from AMSR-E brightness temperature measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 150, pp. 1–19.
9. Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N., Mognard N.M., Légresy B., Remy F., Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 108, No. 3, pp. 240–253.
10. Lemmetyinen J., Kontu A., Kärnä J-P., Vehviläinen J., Takala M., Pulliainen J., Correcting for the influence of frozen lakes in satellite microwave radiometer observations through application of a microwave emission model, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 12, pp. 3695–3706.
11. Sahr K., White D., Kimerling A.J., Geodesic Discrete Global Grid System, *Cartography and Geographic Information Science*, 2010, No. 30, pp. 121–134.
12. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu., Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions, *Progress in Electromagnetics Research B*, 2014, Vol. 59, pp. 123–133.