Модель собственного микроволнового излучения снежно-фирновых слоев Антарктиды

В.В. Тихонов^{1,2}, М.Д. Раев¹, Е.А. Шарков¹, Д.А. Боярский¹, Н.Ю. Комарова¹

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

²*Московский физико-технический институт (государственный университет)
Долгопрудный, 141701, Россия*

В работе представлена электродинамическая модель собственного микроволнового излучения системы «ледниковый покров – снежно-фирновые слои – атмосфера». Модель адаптирована к реальной снежно-фирновой толще Антарктиды: учтена слоистость и структурные особенности каждого слоя (ледяные корки, плотность, средний размер ледяных гранул, дисперсия их размеров, влажность и т.п.). В модели учтены эффекты рассеяния (рассеяние Ми) микроволнового излучения на ледяных частицах. Сравнение модельных расчетов яркостной температуры различных областей Антарктиды (купол, зона стоковых ветров, прибрежная зона) с данными приборов SSM/I и SSMI/S показало хорошее соответствие. В качестве входных параметров модели (температура воздуха и физико-структурные характеристики слоев) были использованы данные Шведско-Японской экспедиции 2007/2008 годов, проводившейся по обширной территории Земли Королевы Мод.

Ключевые слова: Антарктида, снежно-фирновые слои, яркостная температура, модель микроволнового излучения

Одобрена к печати: 16.01.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-200-204

Спутниковая микроволновая радиометрия ледового щита Антарктиды, несмотря на низкое пространственное разрешение, имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами дистанционного зондирования. В первую очередь это высокая чувствительность яркостной температуры поверхностного слоя к изменениям структурных и физических свойств снежно-фирновой среды (температура, размер ледяных зерен, плотность и т.п.), а также независимость получения данных от погодных условий и достаточно длительный (с 1978 г.) и регулярный временной ряд наблюдений (Koenig et al., 2007).

Однозначная интерпретация данных спутниковой микроволновой радиометрии поверхности Антарктиды (определения снегонакопления, зон таяния и т.п.) требует адекватной модели взаимодействия излучения со снежно-фирновой средой, т.е. однозначной связи вариаций яркостной температуры и изменений структуры и физических свойств поверхностных слоев (Koenig et al., 2007; Picard et al., 2009). В настоящее время существует целый ряд моделей, описывающих взаимодействие микроволнового излучения со снежно-фирновой средой поверхностного слоя ледникового покрова Антарктиды. Однако теоретические расчеты не всегда соответствуют спутниковым измерениям, что связано со сложностью учета в моделях всех факторов (температура, слоистость, размер ледяных зерен, плотность, рассеяние Ми и т.д.), влияющих на изменение яркостной температуры поверхности (Bingham, Drinkwater, 2000; Chang et al., 1980; Koenig et al., 2007; Picard et al., 2009).

В работе (Tikhonov et al., 2014) была представлена модель излучения системы «морская поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера». Она была разработана на основе модели излучения плоскостройной среды (Sharkov, 2003) и моделей диэлектрических свойств льда и снега (Tikhonov et al., 2014). Теоретические расчеты яркостной

температуры морского ледяного покрова различной сплоченности хорошо соответствовали данным приборов SSM/I и SSMI/S при учете физических и структурных особенностей льда и снега, а также эффектов рассеяния излучения на ледяных зернах и воздушных порках, которые определялись по теории Ми (Tikhonov et al., 2014).

Данная модель была преобразована в модель излучения системы «ледниковый покров – снежно-фирновые слои – атмосфера» и адаптирована для условий Антарктиды. В качестве входных параметров модели (температура воздуха, плотность и температура снежно-фирновых слоев, средний размер ледяных гранул, дисперсия их размеров, наличие и пористость ледяных корок, размер воздушных пор и т.п.) были использованы данные Шведско-Японской экспедиции 2007–2008 годов (Sugiyama et al., 2010, 2012), проходившей по обширной территории Земли Королевы Мод (рис. 1).

Рис. 1. Район и маршрут проведения Шведско-Японской экспедиции 2007/2008 годов. Точками указаны места исследований структуры слоев. (Sugiyama et al., 2012)

Маршрут проведения экспедиции включал все основные зоны Антарктиды (центральная часть, зона стоковых ветров, прибрежная зона). На протяжении всего маршрута участниками экспедиции рылись шурфы и исследовались физические и структурные характеристики снежно-фирновых слоев (рис. 2).

В качестве источника спутниковой информации была использована база SSM/I и SSMI/S изображений полярных районов POLE-RT-Fields, созданная в отделе «Исследование Земли из космоса» ИКИ РАН (Sharkov, 2003; Tikhonov et al., 2014).

Сравнение модельных расчетов яркостной температуры различных областей Антарктиды (купол, зона стоковых ветров, прибрежная зона) с данными радиометра SSMI/S показало их хорошее соответствие (рис. 3).

Проведенный анализ результатов показал, что большое влияние на яркостную температуру снежно-фирновой толщи Антарктиды оказывает наличие или отсутствие ледяных прослоек (корок) между основными слоями. Причем яркостная температура сильно зависит как от толщины, так и от структуры (пористость, размер воздушных пор) ледяных

Рис. 2. Характеристики снежно-фирновых слоев по маршруту проведения экспедиции (см. рис. 1); (Sugiyama et al., 2012)

Рис. 3. Сравнение модельных расчетов (кривые) с данными прибора SSMI/S (символы) для различных областей Антарктиды: а) прибрежная зона, б) зона стоковых ветров, в) купол (см. рис. 2). Сплошная кривая, звездочки – горизонтальная, пунктир, крестики – вертикальная поляризации

корок. Также на яркостную температуру снежно-фирновой толщи Антарктиды влияет структура (средний размер и дисперсия размера ледяных зерен) и плотность верхних слоев. Помимо этого, в модельных расчетах для высотных областей Антарктиды (купол) необходимо учитывать особенность осадков. В центральных районах большое влияние оказывает антициклоническая деятельность. Осадки в виде снега в центральных районах составляют около 50%, остальные выпадают в виде инея (изморози) и ледяных игл (Котляков, 2000). Ледяные иглы образуются за счет десублимации (конденсации) и вертикальных потоков воздуха сверху вниз. Изморозь – за счет десублимации влаги на поверхности.

Ледяные иглы должны сильно рассеивать собственное микроволновое излучение поверхности и тем самым понижать значение яркостной температуры. Это предположение подтверждается на *рис. 3в*, где расчетные (модельные) значения яркостной температуры для вертикальной поляризации лежат выше значений, полученных прибором SSMI/S.

Полученные результаты и их анализ показывают работоспособность предложенной модели микроволнового излучения системы «ледниковый покров – снежно-фирновые слои – атмосфера» и возможность ее использования для расчета яркостной температуры различных областей ледового щита Антарктиды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00164.

Литература

1. Котляков В.М. Избр. соч. Книга 1. Гляциология Антарктиды. М.: Наука, 2000. 432 с.
2. Bingham A.W., Drinkwater M.R. Recent changes in the microwave scattering properties of the Antarctic ice sheet // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 4. P. 1810–1820.
3. Chang A.T.C., Choudhury B.J., Gloersen P. Microwave brightness of polar firn as measured by Nimbus 5 and 6 ESMR // J. of Glaciology. 1980. Vol. 25. No. 91. P. 85–91.
4. Koenig L.S., Steig E.J., Winebrenner D.P., Shuman C.A. A link between microwave extinction length, firn thermal diffusivity, and accumulation rate in West Antarctica // J. of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. F03018. DOI: 10.1029/2006JF000716.
5. Picard G., Brucker L., Fily M., Gallee H., Krinner G. Modeling time series of microwave brightness temperature in Antarctica // J. of Glaciology. 2009. Vol. 55. No. 191. P. 537–551.
6. Sharkov E.A. Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
7. Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S. Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // Annals of Glaciology. 2010. Vol. 51. No. 55. P. 9–15.
8. Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S. Snow density along the route traversed by the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // J. of Glaciology. 2012. Vol. 58. No. 209. P. 529–539.
9. 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.

A model of microwave emission of Antarctic snow-firn layers

V.V. Tikhonov^{1,2}, M.D. Raev¹, E.A. Sharkov¹, D.A. Boyarskii¹, N.Yu. Komarova¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
Dolgoprudnyi, Moscow oblast 141701, Russia

The paper presents an electrodynamics model of microwave emission of the “ice sheet – snow-firn layers - atmosphere” system. The model is adjusted for the real characteristics of snow-firn cover of the Antarctica, including stratification and structural properties of each layer (ice crusts, density, mean ice grain size, their dispersion, wetness, etc.). The model also considers the effects of microwave scattering by ice grains (Mie scattering). The model brightness temperatures for different regions of Antarctica (dome, zone of katabatic winds, coastal zone) agree well with SSM/I and SSMI/S data. As model input parameters (air temperature and physical and structural layer properties) we used the data of a Swedish-Japanese expedition of 2007/2008 that took place in the vast territory of Dronning Maud Land.

Keywords: Antarctica, snow-firn layers, brightness temperature, model of microwave emission

Accepted: 16.01.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-200-204

References

1. Kotlyakov V.V., *Izbrannye sochineniya. Kniga 1. Glyatsiologiya Antarktidyi* (Selected works in six books. Book 1. Glaciology of Antarctica), Moscow: Nauka, 2000, 432 p.
2. Bingham A.W., Drinkwater M.R., Recent changes in the microwave scattering properties of the Antarctic ice sheet, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 4, pp. 1810–1820.
3. Chang A.T.C., Choudhury B.J., Gloersen P., Microwave brightness of polar firn as measured by Nimbus 5 and 6 ESMR, *J. of Glaciology*, 1980, Vol. 25, No. 91, pp. 85–91.
4. Koenig L.S., Steig E.J., Winebrenner D.P., Shuman C.A., A link between microwave extinction length, firn thermal diffusivity, and accumulation rate in West Antarctica, *J. of Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, F03018. DOI: 10.1029/2006JF000716.
5. Picard G., Brucker L., Fily M., Gallee H., Krinner G., Modeling time series of microwave brightness temperature in Antarctica, *J. of Glaciology*, 2009, Vol. 55, No. 191, pp. 537–551.
6. Sharkov E.A., *Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations*, Berlin: Springer/PRAXIS, 2003, 613 p.
7. Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S., Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08, *Annals of Glaciology*, 2010, Vol. 51, No. 55, pp. 9–15.
8. Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S., Snow density along the route traversed by the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08, *J. of Glaciology*, 2012, Vol. 58, No. 209, pp. 529–539.
9. 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.