2. Бобров П. П., Галеев О. В. Динамика радиояркостной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 4. С. 74–80.

3. Бобров П. П., Ивченко О. А., Кривальцевич С. В. Исследование почвенной структуры методом двухчастотной микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 2. С. 82–88.

4. Особенности сверхвысокочастотного излучения периодически неровных почв / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Ю. К. Шестопалов, И. М. Щеткин // Радиотехника и электроника. 2000. № 10. С. 1059–1067.

5. Beljaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A. Radiohydrophysical model of evaporation of soils moisture // XIV Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics : abstracts / Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Tomsk, 2007. P. 213.

6. Оценка тепловых потоков при испарении с поверхности почв по метеорологическим параметрам и микроволновой радиометрии / А. Л. Афанасьев, П. П. Бобров, О. А. Ивченко, С. В. Кривальцевич // Естественные науки и экология : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 8. Кн. 1. Омск : Изд-во ОмГПУ. 2004. С. 3–6.

7. Бобров П. П. Исследование испарения, влажности и структуры поверхностного слоя почв дистанционными микроволновыми методами // Почвоведение. 2000. № 5. С. 574–578.

8. Ященко А. С., Бобров П. П., Миронов В. Л. Дистанционный радиометрический метод определения некоторых почвенных гидрологических констант // Известия вузов. Физика. 2008. № 9/2. С. 105–110.

9. Пат. 2331062 С1 Российская Федерация, МПК G01N 22/04 / Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С., заявитель и патентообладатель ИФ СО РАН – № 2006135882/09; заявл. 10.10.06; опубл. 10.08.08, Бюл. № 22.

10. Пат. 2411505 С2 Российская Федерация, МПК G01N 22/04 / Миронов В. Л., Бобров П. П., заявитель и патентообладатель ИФ СО РАН. № 2009108599/08; заявл. 10.13.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4.

11. Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С. Суточная динамика радиояркостных температур почв на частотах 1,4 и 6,9 ГГц в процессах промерзания и оттаивания // Радиотехника и электроника. 2010. № 4. С. 424–431.

References

1. Bobrov P. P. Issled. Zemli iz kosmosa. 1999, no. 5, pp. 83–87.

2. Bobrov P. P., Galeyev O. V. Issled. Zemli iz kosmosa. 2001, no. 4, pp. 74–80.

3. Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Krivaltsevich S. V. Issled. Zemli iz kosmosa. 2005, no. 2, pp. 82–88.

4. Bobrov P. P., Belyayeva T. A., Shestopalov Yu. K., Shchetkin I. M. Radiotekhnika i elektronika. 2000, no. 10, pp. 1059–1067.

5. Beljaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A. XIV International Symposium. Atmospheric and Ocean Optics: Abstracts. – Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS. 2007, pp. 213.

6. Afanasyev A. L., Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Krivaltsevich S. V. Yestestvennyye nauki i ekologiya. Vol. 8, Kn. 1. Omsk : OmGPU. 2004, pp. 3–6.

7. Bobrov P.P. Eurasian Soil Science. 2000, no. 5, pp. 501–505.

8. Yashchenko A. S., Bobrov P. P., Mironov V. L. Izvestiya vuzov. Fizika. 2008, no. 9/2, pp.105–110.

9. Pat. 2331062 C1 RF, MPK G01N 22/04. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S., zayavitel i patentoobladatel IF SB RAS – № 2006135882/09; zayavl. 10.10.06; opubl. 10.08.08, Byul. no. 22, 7 p.

10. Pat. 2411505 C2 RF, MPK G01N 22/04. Mironov V. L., Bobrov P. P., zayavitel i patentoobladatel IF SB RAS. № 2009108599/08; zayavl. 10.13.2009; opubl. 10.02.2011, Byul. no. 4, 11 p.

11. Bobrov P. P., Mironov V. L., Yashchenko A. S. Journal of Communications Technology and Electronics, 2010, vol. 55, no. 4, pp. 395–402.

© Бобров П. П., Ивченко О. А., Кривальцевич С. В., 2013

УДК 535.391.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ БУРЯТИИИ КОСМИЧЕСКИМ РАДИОМЕТРОМ SMOS*

П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, А. В. Базаров, С. Б. Раднаева

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахъяновой, 6. E-mail: dpn@ipms.bscnet.ru

Приведены результаты исследования радиояркостной температуры на территории Бурятии по данным космического микроволнового радиометра SMOS/MIRAS. В качестве примера рассмотрены точки, одна из которых находится на акватории оз. Байкал, а другая располагается вблизи озера. Представлены результаты, полученные в летний и зимний период. Показано, что наблюдается значительное расхождение расчета и эксперимента для точки на поверхности оз. Байкал, более удовлетворительное соответствие для точки на суше и хорошее соответствие для контрольной точки, расположенной в экваториальных водах. Сделан вывод о достоверности результатов, получаемых радиометром.

Ключевые слова: SMOS, радиометр, микроволны, радиояркостная температура.

* Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ № 12-05-980622-р_сибирь_а, РФФИ № 13-08-01132, интеграционным проектом СО РАН № 73.

THE RESULTS OF BRIGHTNESS TEMPERATURE MEASUREMENTS AT THE TERRITORY OF BURYATIA MADE WITH SPACE RADIOMETR SMOS

P. N. Dagurov, A. V. Dmitriev, A. V. Bazarov, S. B. Radnaeva

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: dpn@ipms.bscnet.ru

The results of brightness temperature investigation in Buryatia made with microwave radiometer SMOS/MIRAS are presented. As an example, the points located on water area of Lake Baikal and near the lake are considered. The results obtained in the summer and winter period are presented as well. It is shown that there is a significant discrepancy between theory and experiment for a point on the water area of Lake Baikal, a satisfactory agreement for the point on the ground and a good agreement for the control point located in the equatorial waters. It is concluded that the results obtained with the radiometer are reliable.

Keywords: SMOS, radiometer, microwaves, brightness temperature.

Микроволновое дистанционное зондирование Земли является эффективным инструментом изучения процессов, происходящих на земной поверхности, вследствие охвата обширных территорий, в том числе труднодоступных, независимости от погодных условий и освещенности поверхности. В последние годы на космической орбите находится космический аппарат SMOS Европейского космического агентства (ESA) с микроволновым радиометром MIRAS [1], работающий в полосе частот 1 400–1 427 МГц и выполняющий миссию глобального определения влажности почвы и солености океана. Разрешающая способность антенны SMOS на земной поверхности составляет 35–50 км, периодичность пролета над определенной точкой 1–3 дня.

Алгоритмы определения влажности базируются на измерениях радиояркостной температуры T_b, которая связана с коэффициентом излучения χ и эффективной термодинамической температурой T соотношением [2]

$$T_b = \chi T . \qquad (1)$$

Коэффициент χ связан с известными коэффициентами отражения Френеля R_p (индекс *p* зависит от вида поляризации) соотношением

$$\chi = 1 - \left|R_p\right|^2 \qquad (2)$$

В работе приведены некоторые результаты измерения радиояркостной температуры аппаратом SMOS на территории Бурятии в зависимости от угла обзора (падения) при различных поляризациях. Для сравнения также рассмотрены данные, полученные аппаратом SMOS в экваториальных водах.

Представленные результаты получены в основном для рассмотрения соответствия полученных аппаратом SMOS результатов расчетным оценкам.

Для получения космических снимков использовалась архив на портале ESA. Снимки загружались с помощью программного продукта EOLI-SA. Визуализация снимков осуществлялась с помощью программного инструмента BEAM (VISAT). Оба продукта разработаны для ESA и находятся в свободном доступе.

В качестве примера приведена карта радиояркостной температуры, полученная 16.02.2013 г. (рис. 1). На снимке ясно выделяется поверхность озера Байкал, а также активные помехи на территории Китая, проявляющиеся в наличии очень ярких пятен.

Для получения первичных оценок и сравнения были выбраны две точки: точка 1 на акватории Байкала (105,75° в. д., 51,90° с. ш.), точка 2 на территории, примыкающей к Байкалу (106,61° в. д., 52,14° с. ш.). Данная территория является равнинной, наверное, с наибольшими в Бурятии размерами порядка 30 км × 40 км. Отметим, что территория Бурятии имеет гористый рельеф с узкими долинами (шириной до 20 км) между хребтами. В качестве контрольной точки была выбрана точка 3 (124,09° в. д., –1,11° ю. ш.), находящаяся в Молуккском море.

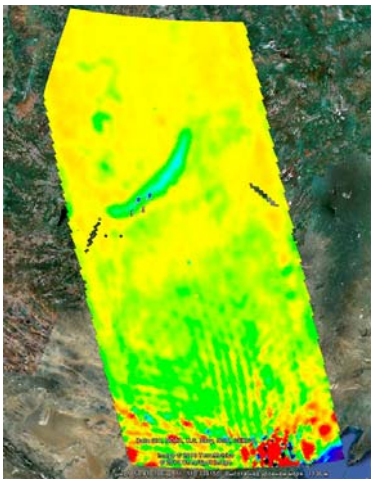

Рис. 1. Снимок 16.02.2013

Зависимости радиояркостных температур при горизонтальной и вертикальной поляризациях от угла падения для точки 1 приведены на рис. 2. В данном случае эти зависимости отображают радиояркостную температуру акватории оз. Байкал 15.07.2012 г. Здесь же показаны результаты расчета по формуле (1). Параметры расчета T, ε', ε'' и h указаны в подписи к рисунку. Эти параметры здесь и для других точек подбирались таким образом, чтобы обеспечить наибольшее соответствие экспериментальных и расчетных результатов.

Представленные данные показывают, что наблюдается заметное расхождение экспериментальных и расчетных результатов, особенно для горизонтальной поляризации. Хотя акватория оз. Байкал представляет собой однородную среду, по видимому, в связи с его сравнительно небольшими поперечными размерами (35–45 км), на яркостную температуру большое влияние оказывает более яркая прилегающая суша. Поэтому радиояркостная температура является некоторой эффективной величиной, которая не описывается расчетами для однородной среды.

Зависимости, полученные для точки 2, приведены на рис. 3. В данном случае наблюдается лучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных, особенно для горизонтальной поляризации.

Для сравнения на рис. 4 показаны зависимости, полученные для контрольной точки 3, находящейся в экваториальных водах. Отметим, что все результаты относятся к одному и тому же снимку. Рассмотрение результатов для точки 3 показывает хорошее согласие теории и эксперимента.

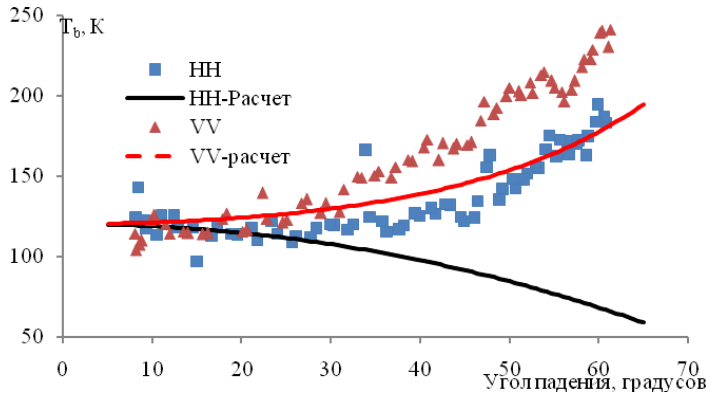

Рис. 2. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры оз. Байкал (точка 1; 15.07.2012 г.; расчет: T = 290 K; $\varepsilon' = 80$; $\varepsilon'' = 0{,}01$; $h = 0{,}005$)

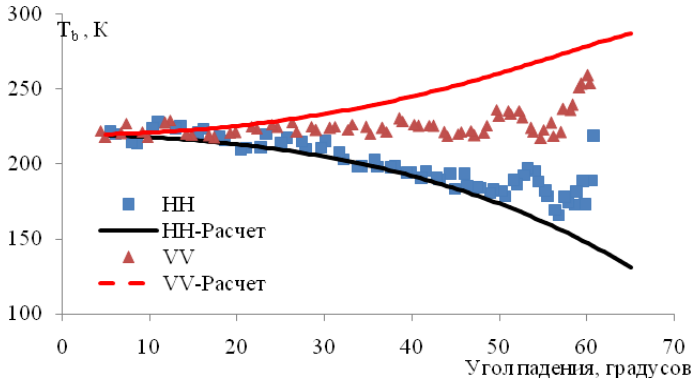

Рис. 3. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры почвы (точка 2; 15.07.2012 г.; расчет: T = 293 K; $\varepsilon' = 9$, $\varepsilon'' = 1$, $h = 0$).

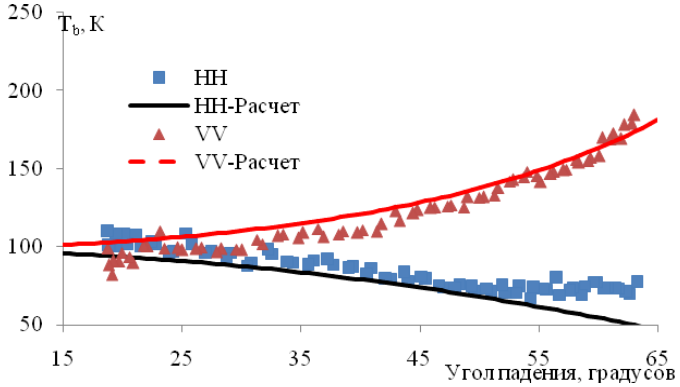

Рис. 4. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры моря (точка 3; 15.07.2012 г.; расчет: T = 283 K, $\varepsilon' = 80$, $\varepsilon'' = 30$; $h = 0$).

Результаты, полученные для этих же точек в зимний период, приведены на рис. 5–7. Здесь обращает на себя внимание несоответствие расчетных и экспериментальных данных в области больших углов падения для ледового покрова оз. Байкал. По-видимому, это объясняется тем, что ледовый покров оз. Байкал представляет собой слой толщиной около 1 м, лежащий на воде. Тогда как расчет сделан в предположении, что лед занимает все полупространство. Также отметим очень хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов для точки 3.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что результаты измерений радиояркостной температуры космическим радиометром SMOS/MIRAS являются достоверными. Отличие расчетных и экспериментальных данных объясняется неоднородной структурой земной поверхности и в связи с большими размерами пиксела, радиояркостная температура формируется как результат совместного действия разнородных составляющих этой поверхности. В связи со случайной в своей основе структурой почвы и ее покровов, представляется необходимым использование статистического подхода к определению радиояркостной температуры почвы и, тем самым, к определению ее влажности [3].

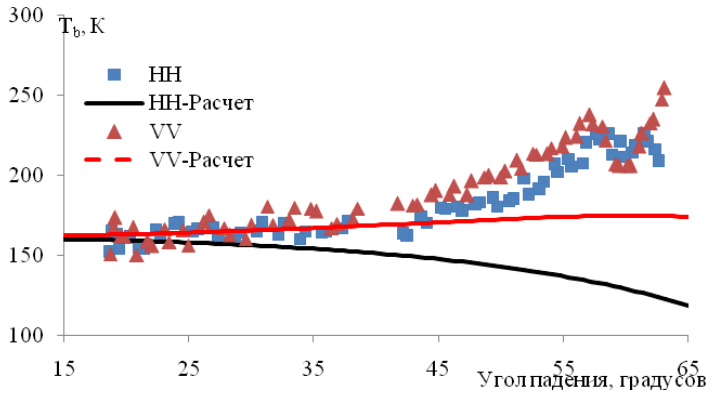

Рис. 5. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры оз. Байкал (точка 1; 16.02.2013г.; расчет: $T = 175$ К; $\varepsilon' = 3{,}15$; $\varepsilon'' = 0{,}01$; $h = 0$).

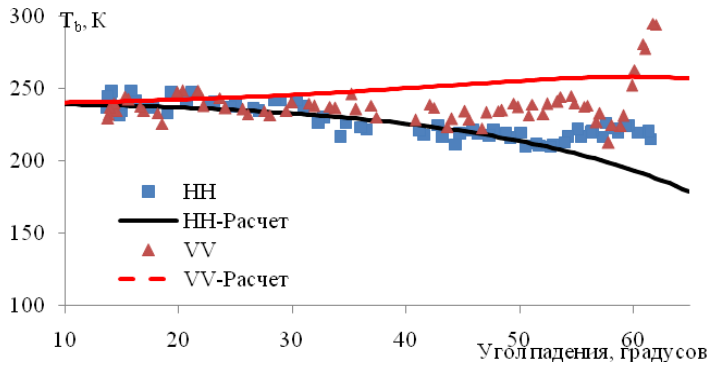

Рис. 6. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры мерзлой почвы (точка 2, 16.02.2013 г.; расчет: $T = 258$ К; $\varepsilon' = 3$; $\varepsilon'' = 0{,}01$; $h = 0$)

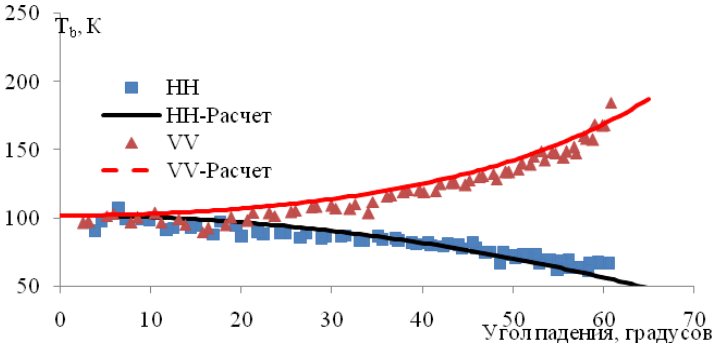

Рис. 7. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры моря (точка 3; 16.02.2013 г.; расчет: $T = 293$ К; $\varepsilon' = 80$; $\varepsilon'' = 30$)

Библиографические ссылки

1. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations // S. Mecklenburg, M. Drusch, Y. Kerr et. al. / IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. Vol. 50, № 3. P. 606–612.

2. Миронов В. Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск : Науч.-издат. центр СО РАН, 2000.

3. Дагуров П. Н. Микроволновая радиометрия статистически-неоднородной поверхности // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 31–32.

References

1. Mecklenburg S., Drusch M., Kerr Y. et. al. ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, vol. 50, no. 3, pp. 606–612.

2. Mironov V. L. Mikrovolnovoye zondirovaniye pochv (Microwavesensing of soils). Novosibirsk, Nauchno-izdatel'skiy tsentr SO RAN, 2000.

3. Dagurov P. N. Izvestiya vuzov. Fizika. 2012, vol. 55, no. 8/2, p. 31–32.

© Дагуров П. Н., Дмитриев А. В.,
Базаров А. В., Раднаева С. Б., 2013

УДК 621.391.14

ОБОРУДОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Т. А. Лепехина, В. И. Николаев, М. А. Семенов, И. В. Чарыков, В. С. Чикачев

Научно-производственный центр «СПУРТ»
Россия, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 4. E-mail: tatonika@inbox.ru

Представлен облик радиолокационного полигона для задач калибровки и валидации космических РСА с позиций системного подхода. Целью работы является создание полигона, позволяющего в сжатые сроки подтверждать сквозные характеристики РСА и контролировать качество его выходного продукта, а также проводить периодические калибровки радиометрической шкалы радиолокатора.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), калибровка, валидация, системный подход, уголковые отражатели, активная контрольная станция.

TEST RANGE EQUIPMENT FOR SRACEBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR CALIBRATION AND VALIDATION

T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev, M. A. Semenov, I. V. Charykov, V. S. Chikachev

Scientific Production Centre "SPURT"
4 1-st Zapadny passage, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia. E-mail: tatonika@inbox.ru

An outline of radar test range for spaceborne SAR calibration and validation using system approach is presented. The goal of the investigation is creating a range permitting SAR through performances approval, its resultant data quality verification procedures, and radiometric scale calibration recurrent routines. Region choice for test range deployment, measured SAR parameter set and metrological means configuration foundation is given in the paper.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), calibration, validation, system approach, corner reflector, active receiver/transponder.

Расширение круга задач, для решения которых применяют радиолокационные изображения (РЛИ), обусловило предъявление к современным РСА повышенных требований как к измерительным средствам. Потребителям необходимо не только высокое разрешение изображения, но и возможность получить из снимка геометрические характеристики объектов, а также электродинамическую и радиометрическую информацию.

В настоящее время существует ряд космических РСА с высоким разрешением, работающих в разных диапазонах частот, поэтому потребитель располагает широким ассортиментом РЛИ, полученных в различных режимах съемки, с разной глубиной обработки и значительно отличающихся по стоимости. Для того чтобы РЛИ, полученные космическим РСА, были конкурентоспособными и гарантировали пользователю решение его задач, процедуры калибровки и валидации необходимо проводить как после вывода радиолокатора на орбиту, так и периодически в процессе эксплуатации, что является достаточно сложной научно-технической и организационной задачей.