Это ограничивает использование алгоритмов в интересах реальных хозяйствующих субъектов, размеры которых менее 300 км. Временное усреднение затрудняет использование этих методов в практике оперативного мониторинга.

Библиографические ссылки

1. Kongoli C., Ferraro R. Development and Evaluation of the AMSU-Based Snow Water Equivalent Retrieval Algorithm // 13th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography. URL: https://ams.confex.com/ams/13SATMET/techprogram/paper_78989.htm/.

2. Документация. URL: http://gis-lab.info/docs.html.

3. Агрометеорологический бюллетень. № 2. Февраль 2012 г. (по оперативным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2012.

4. Агрометеорологический бюллетень. № 3. Март 2012 г. (по оперативным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2012.

5. Агрометеорологический бюллетень. № 2. Февраль 2009 г. (по телеграфным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2009.

6. Агрометеорологический бюллетень. № 3. Март 2009 г. (по телеграфным данным) / Ом. ЦГМС-Р. Омск : [б. и.], 2009.

References

1. Kongoli C., Ferraro R. Development and Evaluation of the AMSU-Based Snow Water Equivalent Retrieval Algorithm. 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Available at: https://ams.confex.com/ams/13SATMET/techprogram/paper_78989.htm (accessed 12 February 2013).

2. Available at: http://gis-lab.info/docs.html (accessed 30 May 2012).

3. Agrometeorologichesky bulletin (Agrometeorological bulletin). No. 2 [text]: for February, 2012 (according to operational data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2012. 16 c.

4. Agrometeorologichesky bulletin (Agrometeorological bulletin). No. 3 [text]: for March, 2012 (according to operational data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2012. 15 c.

5. Agrometeorologichesky bulletin (Agrometeorological bulletin). No. 2 [text]: for February, 2009 (according to cable data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2009. 15 c.

6. Agrometeorologichesky bulletin (Agrometeorological bulletin). No. 2 [text]: for March, 2009 (according to cable data). Omsk. TsGMS-R. Omsk: [b. i.] 2009. 15 c.

© Березин К. Ю., Дмитриев А. В., Дмитриев В. В., 2013

УДК 528.854+631.4

ЗАВИСИМОСТЬ РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ИЗМЕРЕННОЙ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ SMOS, ОТ АЗИМУТАЛЬНОГО УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ*

П. П. Бобров[1], В. Л. Миронов[2], А. С. Ященко[1]

[1]Омский государственный педагогический университет
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x_rays1@mail.ru
[2]Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

Приведены основные результаты анализа угловых зависимостей радиояркостных температур почв, полученных в ходе натурного, модельного эксперимента, а также аппаратом SMOS. Обнаружено, что величина радиояркостной температуры поверхностей, имеющих периодический профиль, существенно зависит от азимутального угла измерения. Такие поверхности при определенных условиях могут иметь значение радиояркостной температуры на горизонтальной поляризации больше, чем на вертикальной. Аналогичные соотношения зачастую наблюдаются в данных SMOS. Показано, что особенности угловых зависимостей радиояркостной температуры, полученные SMOS, могут быть обусловлены как физическими процессами, так и аппаратными ошибками. Полученные результаты могут быть использованы при обработке радиометрических данных SMOS.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, яркостная температура, коэффициент излучения, SMOS.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки в части проведения НИР.

DEPENDENCE OF BRIGHTNESS TEMPERATURE SOUNDED WITH SPACECRAFT SMOS ON THE AZIMUTH ANGLE OF SOUNDING

P. P. Bobrov[1], V. L. Mironov[2], A. S. Yashchenko[1]

[1]Omsk State Pedagogical University
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: x_rays1@mail.ru
[2]Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

The results of the analysis of angular dependence of soil brightness temperature obtained in the natural, model experiment, and with SMOS satellite, are presented. It is found that the value of surfaces brightness temperature with periodic profile considerably depends on the azimuth angle of sounding. Such surfaces under certain conditions can have a value of brightness temperature greater on the horizontal polarization than on the vertical polarization. Similar correlations are often observed in the SMOS data. It is shown that the features of the angular dependence of brightness temperature obtained by SMOS can be explained both by natural processes and hardware errors. The results can be used in the SMOS data processing.

Keywords: microwave radiometry, brightness temperature, emissivity, SMOS.

Основной функцией миссии SMOS является картирование влажности почв и солености поверхностного слоя Мирового океана в глобальном масштабе. На спутнике установлен 2-D интерференционный радиометр MIRAS, работающий в диапазоне частот 1,400–1,427 ГГц (L-диапазон). Радиометрическая съемка поверхности Земли осуществляется с периодичностью один раз в 1–2 сутки в следующих режимах: горизонтальная поляризация (HH), вертикальная поляризация (VV) и кросс-поляризация (VH). Данные о радиояркостной температуре ($T_я$) и влажности поверхностного слоя почв (W) для данного участка поверхности предоставляются с периодичностью не менее одного раза в три дня. Максимальная заявленная погрешность определения влажности не превышает, по словам разработчиков, 4 % по абсолютной величине. Контур радиометрического снимка MIRAS имеет характерную гексагональную форму. Разрешение снимка не является постоянной величиной, убывая от центра к периферии снимка; наилучшее разрешение при зондировании в надир – 32 км, наихудшее при зондировании под углом 65° – 101 км (рис. 1). Ширина полосы съемки вдоль трассы пролета составляет в среднем 1 300 км.

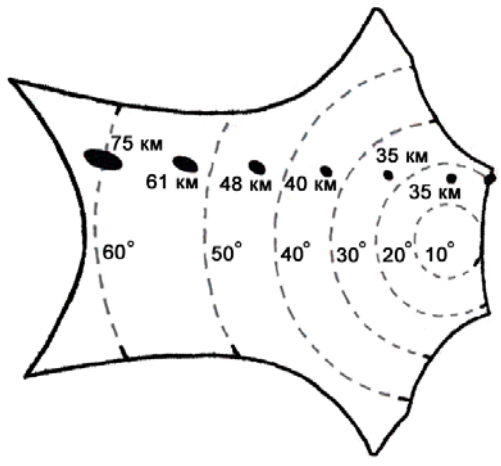
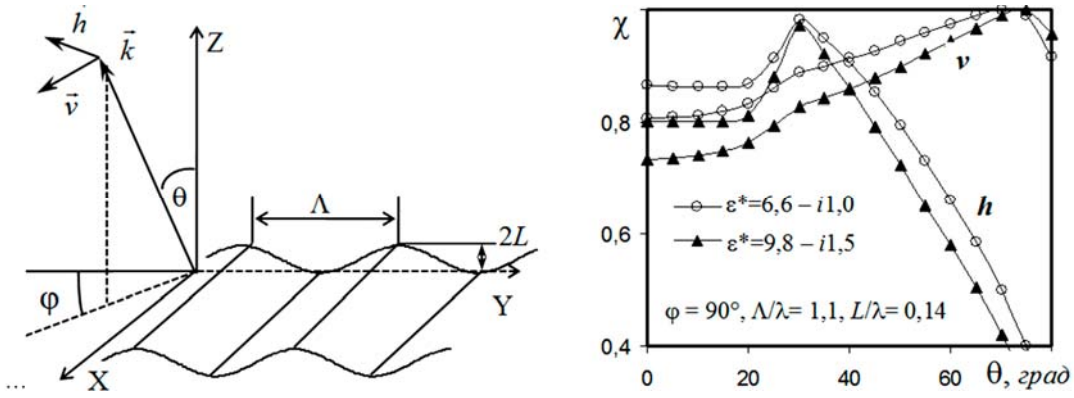


Рис. 1. Контур радиометрического снимка SMOS. Пунктирные линии соответствуют указанному углу зондирования. Черные овалы – характерный размер пикселя радиометрического снимка в данном месте кадра

Изучение угловых зависимостей $T_я$ поверхности почв, измеренных КА SMOS, показывают, что зачастую они существенно отличаются от теоретических зависимостей. В отдельные моменты времени наблюдаются аномально высокие значения радиояркостной температуры, существенно превышающие термодинамическую температуру. Такое поведение можно объяснить тем, что среднеквадратичное отклонение значений $T_я$, а следовательно, и погрешность измерений значительно увеличиваются по мере приближения к краю радиометрического снимка [1]. Похожие выводы опубликованы нами в работе [2]. Еще одним отступлением от теории являются факты превышения значений $T_я$ на горизонтальной поляризации над значениями на вертикальной, что не характерно ни для почв с гладкой, ни для почв со статистически неровной поверхностью.

Однако реальные земные поверхности могут иметь частично упорядоченный рельеф, например, поверхность почв, обрабатываемых механическими орудиями, растительность при рядовом способе посева и т. п. Угловые зависимости коэффициента излучения в этом случае зависят от азимутального угла [3]. Результаты расчета зависимости коэффициента излучения от угла зондирования при азимутальном угле $\varphi = 90°$ для поверхности почвы с синусоидальным профилем поверхности приведены на рис. 2. Видно, что излучение является поляризованным даже при нулевом угле зондирования. При углах от 0 до 40° коэффициент излучения на горизонтальной поляризации больше, чем на вертикальной, при этом под углом 30° коэффициент излучения на горизонтальной поляризации достигает значения, равного 0,97.

Еще одной причиной превышения излучения на горизонтальной поляризации χ_h над χ_v может быть наличие на поверхности растительности с выраженными вертикальными стеблями (зерновые, подсолнечник и т. п.). В таком случае растительный слой будет иметь в вертикальном направлении диэлектрическую проницаемость большую, чем на вертикальной. Результаты натурного эксперимента, где обнаруживается указанный эффект [4], приведены на рис. 3. Как можно видеть из приведенных данных, $T_я$ на горизонтальной поляризации превышает $T_я$ на вертикальной, при этом между наземными и спутниковыми данными наблюдается соответствие в пределах погрешности.



а *б*

Рис. 2. Геометрия поверхности с синусоидальным профилем (*а*)
и результаты расчета коэффициента излучения из такой поверхности
при азимутальном угле φ = 90° (*б*)

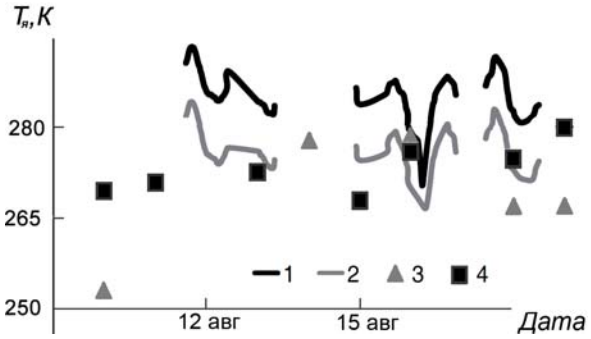


Рис. 3. Результаты эксперимента:
1, *2* – данные наземных измерений $T_я$ для почвы, покрытой растительностью;
3, *4* – данные SMOS для пикселя, в пределах которого проходили измерения на горизонтальной
и вертикальной поляризации, соответственно. Угол зондирования Θ = 30°

При пролете спутника SMOS радиотепловое излучение одного и того же участка поверхности регистрируется под разными углами относительно надира – углами зондирования, азимутальные углы относительно направления «север–юг» при этом также изменяются (рис. 4). Для выявления факта влияния азимутального угла съемки на результат измерений $T_я$ спутником SMOS имеющиеся ряды данных за период январь 2010 – январь 2013 гг. были разбиты на следующие группы углов: 0°±10°, 90°±10°, 180°±10° и 270°±10°. В данных SMOS направление от спутника к зондируемому участку, совпадающее с направлением на географический юг, принимают за азимутальный угол, равный φ = 0°. Из всего массива углов зондирования для построения временных рядов данных был выбран диапазон углов зондирования в 41,5°±1°, как наиболее часто встречающийся (см. рис. 1). В случае если в указанном диапазоне углов зондирования одномоментно попадало несколько значений $T_я$, данные усреднялись. Сравнение полученных рядов данных показало, что значения, относящиеся к азимутальным углам 0°±10° и 180°±10°, в период вспашки и вегетации не отличаются друг от друга в пределах погрешности измерений аппаратуры. Различие между рядами данных 0°±10° и 90°±10° значительно превышало погрешность, но дальнейший анализ указал на факт искусственного происхождения этого эффекта. Во-первых, это различие наблюдается в любое время года, в течение всего анализируемого временного промежутка. Во-вторых, заметно для любых ландшафных зон: от степей, с большими площадями пашни, до северной заболоченной лесостепи. В-третьих, ряды данных, относящиеся к диапазону 90°±10°, соответствовали пикселям, находящимся вблизи края радиометрического снимка, погрешность измерения для которых имеет существенно большее значение, чем в центре кадра.

Таким образом, влияние анизотропии поверхностного слоя почв на величину $T_я$, обусловленное наличием травяной растительности, а так же выделенным направлением вспашки почв, заметное при наземных экспериментах, практически не наблюдается при спутниковой съемке. Это может быть объяснено:

– слабым влиянием указанного фактора на излучательную способность почв, сравнимую с погрешностью измерений SMOS;

– значительным размером пикселя радиометрического снимка;

– наличием в пределах области, излучающей в пиксель, различных объектов, приводящих к квазиизотпроности поверхностного слоя.

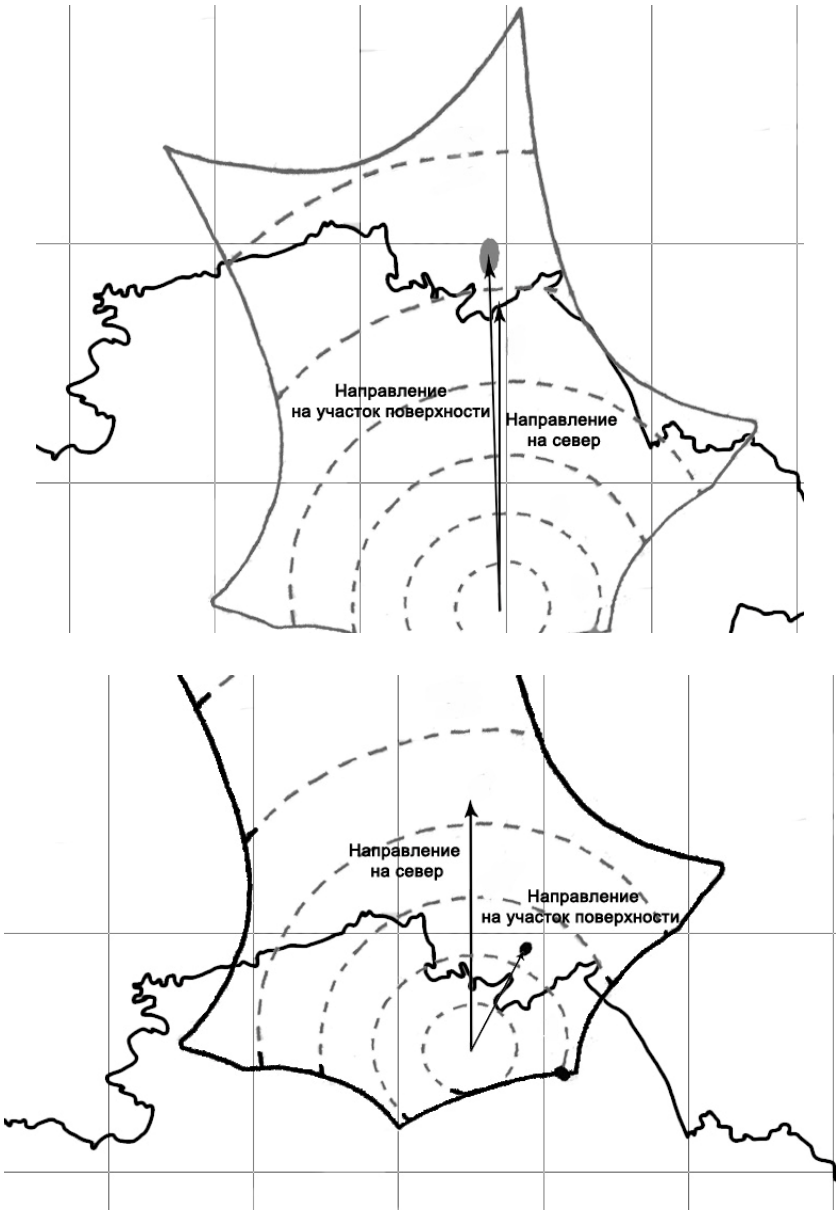


Рис. 4. Изменение азимутального угла съемки пикселя при пролете спутника SMOS

Библиографические ссылки

1. SMOS Calibration and Instrument Performance After One Year in Orbit / R. Oliva, M. Martin-Neira, I. Corbella et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. Vol. 51, № 1. P. 654–670.

2. Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С. Статистический анализ данных спутника SMOS о радиояркостной температуре территории юга Омской области и Северного Казахстана // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 142–143.

3. 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.

4. Results of the SMOS Data Validation over a Steppe and Forest Area in Siberia / P. P. Bobrov, V. L. Mironov, E. G. Shvetsov et al. // Proc. of PIERS'2011. P. 121–124.

References

1. Oliva R., Martin-Neira M., Corbella I., Torres F., Kainulainen J., Tenerelli J. E., Cabot F., and Martin-Porqueras F. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013, vol. 51, no. 1, pp. 654–670.

2. Bobrov P. P., Mironov V. L.,Yashchenko A. S. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 142–143.

3. Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Shestopalov Y. S., Shchetkin I. M. Radiotehnika i elektronika. 2000, no 10, pp. 1059–1067.

4. Bobrov P. P., Mironov V. L., Shvetsov E. G., Sukhinin A. I. and Yashchenko A. S Proc. of PIERS'2011, pp. 121–124.

© Бобров П. П., Миронов В. Л., Ященко А. С., 2013