

УДК 528.8.04

Радиояркостьная температура земных покровов, измеренная микроволновым радиометром SMOS, и задача восстановления влажности почвы

П.Н. Дагуров, А.В. Дмитриев, Ж.Б. Дымбрылов, С.Б. Раднаева*

*Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6*

Поступила в редакцию 1.03.2014 г.

Приведены поляризационно-угловые зависимости радиояркостьной температуры, измеренной космическим радиометром SMOS в L -диапазоне частот на различных участках земной поверхности. Установлено, что в ряде случаев результаты измерений не описываются существующей моделью для коэффициента отражения микроволн, что приводит к ошибкам при восстановлении влажности почвы. Расчетным путем показано, что слоистая структура влажности почвы оказывает существенное влияние на поведение радиояркостьной температуры. Предложено дополнить алгоритм восстановления влажности методом, учитывающим возможную слоистую структуру влажности почвы.

Ключевые слова: микроволновое зондирование, радиояркостьная температура, влажность почвы, слоистая почва; microwave sensing, brightness temperature, soil moisture, layered soil.

Введение

Дистанционное космическое зондирование Земли в настоящее время является эффективным средством исследования и мониторинга земных покровов. Наряду с оптическими сенсорами и радарами с синтезированной апертурой в практике дистанционного зондирования нашли широкое применение пассивные микроволновые радиометры, которые, как и радары, обладают таким достоинством, как независимость от времени суток и наличия облачности. Кроме того, микроволны способны проникать внутрь земных покровов с глубиной проникновения, пропорциональной длине волны. С другой стороны, большая длина волны приводит к низкой разрешающей способности микроволновых сенсоров, составляющей в зависимости от частоты излучения и размера антенны километры – десятки километров.

Микроволновая радиометрия основана на измерении радиояркостьной температуры земной поверхности T_b , которая связана с коэффициентом излучения χ и эффективной термодинамической температурой поверхности T соотношением [1–3]:

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

Коэффициент χ , в свою очередь, связан с коэффициентами отражения Френеля r по мощности зависимостью

$$\chi = 1 - r. \quad (2)$$

Измеренные значения радиояркостьной температуры при наличии определенных физических, эмпирических или полуэмпирических моделей и соответствующих им алгоритмов решения обратной задачи дают возможность восстановить различные свойства и характеристики земных покровов.

К числу важных параметров, определяемых методами микроволновой радиометрии, относится влажность почвы. Кроме того, что она непосредственно влияет на урожайность, она относится к числу характеристик, определяющих круговорот воды в природе и влияющих на климатические процессы на Земле [4]. В 2009 г. Европейским космическим агентством был запущен спутник SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) с радиометром MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis), регистрирующий радиояркостьную температуру в L -диапазоне частот в полосе 1400–1427 МГц. Разрешающая способность антенны SMOS на земной поверхности составляет 35–50 км, периодичность пролета над определенной точкой 1–3 дня. Основная миссия спутника SMOS, как следует из его названия, заключается в исследовании влажности почвы и солености океана [5].

Помимо этих задач также изучаются возможности по применению данных SMOS для других приложений, например для определения толщины морского льда [6]. Определение влажности почвы базируется на выраженной зависимости радиояркостьных температур от влажности, причем чувствительность изменений температуры к изменениям влажности максимальна в L -диапазоне частот. К настоящему времени получен большой объем измерений радиояркостьных температур спутником SMOS на различных территориях [7–15]. Необходимо отме-

* Павел Николаевич Дагуров (dpn@ipms.bsnet.ru); Алексей Валерьевич Дмитриев (dav@ipms.bsnet.ru); Жаргал Баирович Дымбрылов (zdymbrylov@gmail.com); Сэсэгма Батуевна Раднаева (sesegra@yandex.ru).

тять, что в ряде случаев полученные результаты неоднозначны и слабо коррелируют как с наземными измерениями, так и с измерениями, выполненными другими сенсорами. Серьезную проблему представляют мешающие излучения [16].

Уникальной способностью спутника SMOS является измерение радиояркой температуры при разных углах падения на различных поляризациях. Данная многоканальность измерений позволяет оценивать корректность моделей, применяемых для восстановления влажности почвы, и может служить основой для их модернизации. В настоящей статье представлены результаты исследования поляризационно-угловых зависимостей, полученные для различных участков земной поверхности. В качестве одной из возможных причин, ответственных за различие измеренных и модельных зависимостей, рассматривается влияние слоистой структуры влажности по глубине.

Восстановление влажности почвы из измерений радиояркой температуры

Обратная задача восстановления влажности почвы на основе измеренных значений радиояркой температуры основана на итеративном процессе минимизации целевой функции, основной компонентой которой является сумма квадратов отклонений между измеренными и модельными значениями радиояркой температуры при разных углах наблюдения. Понятно, что обоснованность модели определяет точность полученных результатов. В основе прямой модели лежит хорошо выраженная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости почвы от ее влажности, обусловленная большой разницей между диэлектрическими проницаемостями сухой почвы и воды. Коэффициенты отражения Френеля, определяющие коэффициент излучения (2), в свою очередь, определяются значениями диэлектрической проницаемости и угла падения. Для расчета диэлектрической проницаемости почвы в зависимости от ее влажности, состава, температуры, частоты, излучения разработаны различные модели. В настоящее время в алгоритме восстановления влажности с помощью данных, полученных спутником SMOS используется модель [17].

В качестве прямой модели для определения коэффициентов отражения от почвы без растительности была разработана простая полуэмпирическая модель для L -диапазона, получившая название L -MEV (Microwave Emission of the Biosphere) [18]. В данной модели коэффициент отражения от шероховатой почвы $r_{sp}(\theta)$ в зависимости от угла падения θ имеет следующий вид:

$$r_{sp}(\theta) = [(1 - Q)r_p(\theta) + Qr_q(\theta)] \exp(-H \cos^{N_p}(\theta)), \quad (3)$$

где r_p — коэффициенты отражения Френеля; индекс p обозначает поляризацию: $p = h$ для горизонтальной поляризации и $p = v$ для вертикальной

поляризации. Параметр Q характеризует степень деполаризации волны при отражении от шероховатой поверхности и принимает значения меньше единицы. Функция $r_p(\theta)$ представляет собой коэффициент отражения Френеля по мощности при той же p — поляризации, индекс q соответствует ортогональной поляризации. Параметр H описывает шероховатость поверхности, показатель N_p определяет угловую зависимость влияния шероховатости на коэффициент отражения.

Поскольку модель является полуэмпирической и в большой степени основанной на экспериментальных данных, она не может рассматриваться как универсальная и достоверная для всех видов почв и территорий. Параметры H , N_p в разных исследованиях могут быть различными. Так, параметр N_p у разных авторов может принимать значения от -1 до 2 . Теоретически обоснованным является выражение, полученное методом Кирхгофа для когерентной составляющей коэффициента отражения от шероховатой поверхности

$$H = (2k\sigma)^2, \quad (4)$$

где k — волновое число; σ — среднеквадратичное отклонение высоты шероховатостей почвы. Однако можно отметить, что использование выражения (4) в ряде случаев не согласуется с экспериментальными зависимостями.

Поляризационно-угловые зависимости радиояркой температуры для различных поверхностей

Для оценок и сравнения поляризационно-угловых зависимостей радиояркой температуры анализировались данные для различных участков земной поверхности без леса: это участок на акватории Байкала; равнинная территория, примыкающая к Байкалу с размерами порядка 30×40 км; одна из долин Бурятии (отметим, что территория Бурятии имеет гористый рельеф с долинами шириной до $20-30$ км между хребтами); пустыня Гоби в Монголии. Кроме того, в качестве контрольных участков использовались водные поверхности (Ладожское озеро, северные и южные моря). Необходимо отметить, что помимо постоянных помех антропогенного характера на определенных территориях, обычно связанных с крупными городами и проявляющихся в пятнах с высокой температурой, на снимках SMOS часто регистрируются помехи непонятного характера обычно в виде полос с высокой температурой, иногда повторяющиеся изо дня в день. Такие снимки не обрабатывались.

На рис. 1–3 в качестве примера приведены зависимости радиояркой температуры T_b (К) некоторых участков земной поверхности от угла падения. На рисунках аббревиатура НН, как принято в теории и практике микроволнового дистанционно зондирования, означает прием горизонтально поляризованного излучения антенной, имеющей

горизонтальную поляризацию, и VV обозначает соответствующую ситуацию в случае вертикальной поляризации. Результаты, представленные на рис. 1–3, получены из одного снимка 30.08.2013 г.

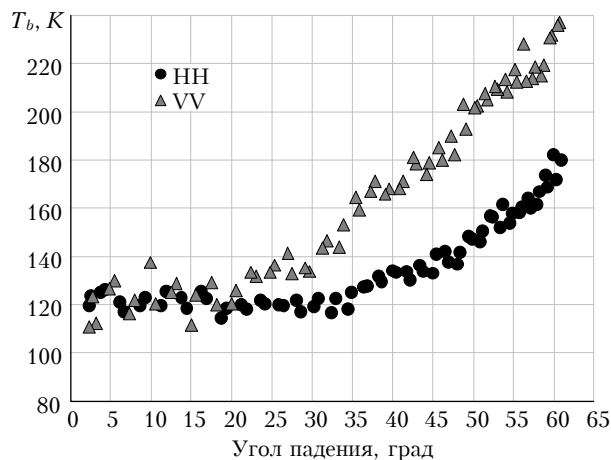


Рис. 1. Поляризационно-угловые зависимости радиояростной температуры оз. Байкал и прибрежного участка (52,274° с.ш., 106,325° в.д.)

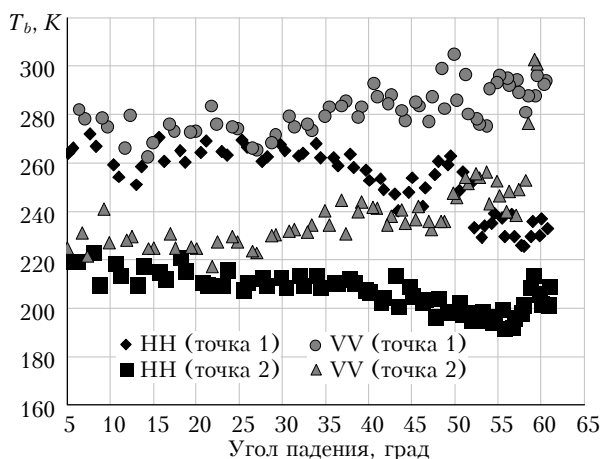


Рис. 2. Поляризационно-угловые зависимости радиояростной температуры почвы пустыни Гоби (точка 1: 44,703° с.ш., 109,918° в.д.; точка 2: 47,582° с.ш., 109,149° в.д.)

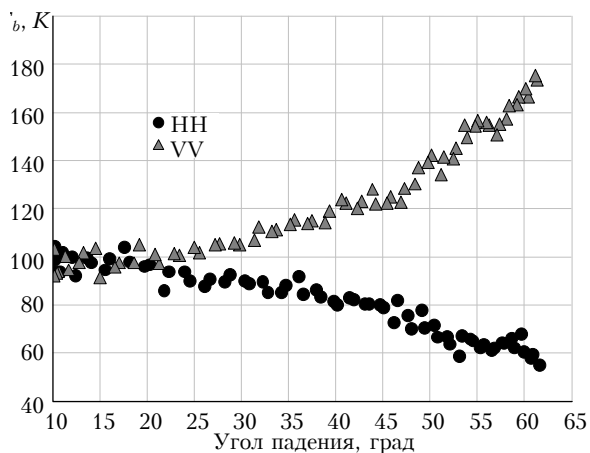


Рис. 3. Поляризационно-угловые зависимости радиояростной температуры экваториального моря (2,999° с.ш., 19,520° в.д.)

На рис. 1 показаны зависимости радиояростной температуры части акватории оз. Байкал и прилегающего участка суши в дельте р. Селенги. На рис. 2 приведены зависимости, полученные для двух точек в пустыне Гоби, а на рис. 3 – результаты измерений в экваториальных водах.

Представленные данные показывают, что для Байкала и Гоби наблюдаются заметные расхождения экспериментальных результатов и известных модельных представлений, при которых с увеличением угла наблюдения в соответствии с поведением коэффициентов отражения радиояростная температура на горизонтальной поляризации должна уменьшаться, а на вертикальной – возрастать. Данные для горизонтальной поляризации на рис. 1 даже качественно не соответствуют ожидаемым теоретическим зависимостям, обусловленным поведением коэффициентов Френеля.

Для сравнения на рис. 3 показаны зависимости, полученные для контрольной точки, находящейся в экваториальных водах. Анализ результатов для данной точки показал хорошее согласие между измеренными зависимостями и простым расчетом по формуле (2) с использованием коэффициентов отражения Френеля для плоской поверхности. Для сопоставления результатов, полученных для оз. Байкал, был проведен анализ поляризационно-угловых зависимостей для другого пресного водоема – Ладожского озера (60,75° с.ш., 31,5° в.д.), имеющего наибольшую ширину 138 км, что намного превышает размер пикселя SMOS. Этот анализ показал, что для Ладожского озера в летний период, так же как и для морских поверхностей южных морей и морей Северного Ледовитого океана, обычно наблюдается хорошее согласие между расчетом и измерениями. Это позволяет утверждать, что полученные зависимости для неоднородных (вода – почва) и почвенных участков достаточно достоверно отображаются радиометром спутника и имеющиеся расхождения между экспериментальными и расчетными результатами объясняются тем, что используемые соотношения (1)–(3) не отражают всех механизмов формирования радиояростной температуры. Для адекватного восстановления влажности почвы необходимо найти эти механизмы и учесть их в алгоритме восстановления влажности почвы.

Оценка влияния неоднородности почвы на измерения радиояростной температуры

Реальная почва в той или иной степени является неоднородной как по площади, так и по глубине. Проведем элементарные оценки влияния неоднородности почвы на поляризационно-угловые зависимости радиояростной температуры. В связи с большим размером пикселя снимков SMOS в большинстве случаев радиояростная температура конкретного пикселя представляет собой результат суммарного влияния различных типов земных покровов, таких как почва без растительности, поля с травянистыми

растениями, лес, водоемы, урбанизированные территории и т.д. Такие ситуации в алгоритмах SMOS учитываются с использованием суммирования отдельных вкладов различных типов поверхности, описываемого соотношениями

$$T_b = \sum_i a_i \chi_i T_i, \quad \sum_i a_i = 1, \quad (5)$$

где a_i , χ_i , T_i – относительный вклад, коэффициент излучения и термодинамическая температура i -го типа поверхности соответственно; значения e_i определяются из соотношения (3).

Коэффициенты отражения в формулах (2) и (3) предполагают, что отражение происходит от однородного полупространства с плоской границей, а влияние шероховатости почвы учитывается экспоненциальным сомножителем в формуле (3). Поэтому из формулы (5) следует, что характер зависимости радиояркостных температур от угла обзора не изменится. С увеличением угла температура, измеренная на горизонтальной поляризации, будет падать, а при вертикальной поляризации вплоть до угла Брюстера будет расти.

В существующих алгоритмах восстановления влажности почвы не учитывается возможная слоистая структура влажности по глубине. Однако расчеты для идеализированного случая дискретно-слоистой почвы, состоящей из двух слоев с различной влажностью, показали, что влияние слоистости может быть достаточно значительным. Это следует из зависимостей радиояркостной температуры, приведенных на рис. 4 для случая, когда сухой слой почвы лежит на влажном полупространстве.

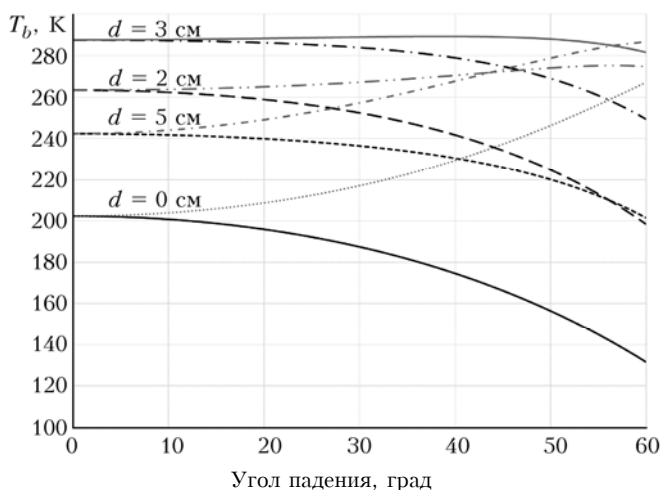


Рис. 4. Поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры для двухслойной почвы

Расчеты коэффициентов отражения от двухслойной среды проводились по известной формуле [19]. Диэлектрическая проницаемость влажной почвы вычислялась по эмпирическим зависимостям, полученным в [20]. Представленные результаты вычислялись при влажности верхнего слоя 5% и влажности нижнего слоя 25% при различной толщине d верхнего слоя. Видно, что небольшие изменения

толщины слоя приводят к заметным изменениям радиояркостных температур. Исходя из этого, представляется необходимым дополнить существующий алгоритм восстановления влажности почвы методом, учитывающим вертикальную структуру влажности в верхнем слое толщиной до нескольких сантиметров. При этом, конечно, потребуется разработка алгоритма определения структуры слоистости, основанная на учете таких параметров, как свойства почвы, осадки, температура воздуха и т.п.

Заключение

Таким образом, в работе представлены поляризационно-угловые зависимости радиояркостной температуры, полученные с помощью космического радиометра SMOS в L -диапазоне частот на различных участках земной поверхности. В ряде случаев результаты измерений не описываются существующей моделью для коэффициента отражения микроволн, что приводит к ошибкам при восстановлении влажности почвы. Показано, что слоистая структура влажности почвы оказывает существенное влияние на поведение радиояркостной температуры. Предложено при восстановлении влажности почвы учитывать ее возможное слоистое строение по глубине.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-05-98062-р_сибирь_a.

1. *Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer, 2003. 613 p.
2. *Thermal microwave radiation: Applications for remote sensing.* Ed. Mätzler C. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006. 555 p.
3. *Миронов В.Л., Бобров П.П.* Микроволновое радиометрическое зондирование почв // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 12. С. 1121–1123.
4. *Encyclopedia of Hydrological Sciences.* Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 3243 p.
5. *Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proc. IEEE. 2010. V. 98, N 5. P. 666–687.
6. *Kaleschke L., Tian-Kunze X., Maaß N., Mäkynen M., Drusch M.* Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N 5. P. L05501.
7. *Gherboudj I., Magagi R., Gonta K., Berg A.A., Toth B., Walker A.* Validation of SMOS data over agricultural and boreal forest areas in Canada // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50, N 5. P. 1623–1635.
8. *Leroux D.J., Kerr Y.H., Richaume P., Fieuzal R.* Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale // Remote Sens. Environ. 2013. V. 133, N 6. P. 240–250.
9. *Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., Savin I.V.* Retrieving temperature gradient in frozen active layer of arctic tundra soils from radiothermal observations in L-band – theoretical modeling // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote sensing. 2013. V. 6, № 3. P. 1781–1785.

10. Rowlandson T.L., Hornbuckle B.K., Bramer L.M., Patton J.C., Logsdon S.D. Comparisons of evening and morning SMOS passes over the Midwest United States // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50, N 5. P. 1544–1554.
11. Lawrence H., Wigneron J.-P., Richaume P., Novello N., Grant J., Mialon A., Al Bitar A., Merlin O., Guyon D., Leroux D., Bircher S., Kerr Y. Comparison between SMOS Vegetation Optical Depth products and MODIS vegetation indices over crop zones of the USA // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140, N 1. P. 396–406.
12. Романов А.Н., Хвостов И.В., Павлов В.Е., Винокуров Ю.И. Дистанционный мониторинг заболоченных территорий Западной Сибири с использованием данных спутника SMOS (ESA) // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 150–153.
13. Бобров П.П., Миронов В.Л., Яценко А.С. Особенности яркостных характеристик территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана в период таяния снежного покрова, измеряемых космическим аппаратом SMOS // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 16–18.
14. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Базаров А.В., Раднаева С.Б. Результаты измерений радиояркостной температуры на территории Бурятии космическим радиометром SMOS // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 22–26.
15. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Нестеров А.С., Раднаева С.Б. Поляризационные и угловые зависимости радиояркостной температуры по данным космического радиометра SMOS // Изв. вуз. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 187–190.
16. Daganzo-Eusebio E., Oliva R., Kerr Y.H., Nieto S., Richaume P., Mecklenburg S.M. SMOS Radiometer in the 1400–1427-MHz Passive Band: Impact of the RFI Environment and Approach to Its Mitigation and Cancellation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. V. 51, N 10. P. 4999–5007.
17. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. V. 47, N 7. P. 2059–2070.
18. Wigneron J.-P., Kerr Y., Waldteufel P., Saleh K., Escorihuela M.-J., Richaume P., Ferrazzoli P., Grant J.P., Hornbuckle B., de Rosnay P., Calvet J.-C., Pellarin T., Gurney R., Mätzler C. L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Results from calibration against experimental data sets over crop fields // Remote Sens. Environ. 2007. V. 107, № 4. P. 639–655.
19. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
20. Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Raies M.A., Wu L. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1985. V. 23, N 1. P. 25–34.

P.N. Dagurov, A.V. Dmitriev, Zh.B. Dymbrylov, S.B. Radnaeva. Earth's surface brightness temperature measured by the microwave radiometer SMOS, and the problem of soil moisture recovering.

The angular and polarization dependencies of the brightness temperature measured by the spaceborne radiometer SMOS in L-band on different parts of the earth's surface are shown. It is found that in some cases the results are not described by the existing model for the reflection coefficient of microwaves, which leads to errors in recovering of soil moisture. It is shown by calculation that the layered structure of soil moisture has a significant impact on the behavior of brightness temperature. It is proposed to expand the moisture-recovering algorithm by the method, which takes into account possible layered structure of the soil moisture.