

*П.П. БОБРОВ\*, В.Л. МИРОНОВ\*\*,\*\*\*, А.С. ЯЩЕНКО\**

## АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ ПО РАДИОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, ИЗМЕРЕННОЙ СПУТНИКОМ SMOS И ЕГО СРАВНЕНИЕ СО ШТАТНЫМ АЛГОРИТМОМ SMOS<sup>1</sup>

На основании изучения данных уровней 1с и 2 спутника SMOS по территории юга Западной Сибири за период с 29.09.10 г. по 10.11.11г., периодических наземных измерений яркостной температуры на частоте 1,4 ГГц и прямых измерений влажности сделаны выводы об основных недостатках данных уровня Level 2. Предложен простой алгоритм дистанционного определения влажности почв по значениям яркостной температуры на уровне Level 1с и проведено его тестирование с использованием данных о влажности почвы, приводимых на уровне Level 2, и отдельными результатами прямых измерений влажности.

**Ключевые слова:** влажность почв, радиояркостная температура, спутник SMOS.

Достоверная и своевременная информация о величине влажности поверхностного слоя почв требуется во многих отраслях науки и народного хозяйства. Количественное определение влажности поверхностного слоя почв с удовлетворительной точностью возможно лишь с привлечением микроволновых радиометрических методов. На борту спутника SMOS Европейского космического агентства, предназначенного для мониторинга влажности почв и солёности океана, установлен 2-Д интерферометрический радиометр, работающий на частоте 1,4 ГГц [1].

В пассивных микроволновых методах используется собственное радиотепловое излучение почв, измеряемое яркостной температурой  $T_y$ , которая для почв с гладкой поверхностью определяется следующим выражением:

$$T_y = T_{\text{эфф}} \left( 1 - |r_{0P}|^2 \right), \quad (1)$$

где  $T_{\text{эфф}}$  – эффективная температура;  $r_{0P}$  – комплексный френелевский коэффициент отражения от гладкой поверхности (по амплитуде), зависящий от комплексной диэлектрической проницаемости почвы (КДП). Однако в реальности поверхность почвы не является гладкой. Наличие шероховатости поверхности приводит к возрастанию яркостной температуры.

Разработчики алгоритмов обработки данных SMOS провели масштабные эксперименты с использованием наземных и самолетных радиометрических установок для выяснения возможности учета влияния шероховатости на яркостную температуру. Было использовано следующее выражение, справедливое для маломасштабных неровностей [2]:

$$T_{yP} = T_{\text{эфф}} \left( 1 - |r_{0P}|^2 \exp \left( -h (\cos \varphi)^{N_p} \right) \right), \quad (2)$$

где  $P$  – индекс поляризации ( $H$  или  $V$ );  $\varphi$  – угол зондирования, отсчитываемый от надира;  $h$  и  $N_p$  – подбираемые параметры.

Другой проблемой является определение эффективной температуры. В работе [3] была предложена следующая формула приближенного определения эффективной температуры:

$$T_{\text{эфф}} = T_{\text{гл}} + (T_{\text{пов}} - T_{\text{гл}}) \left( \frac{W_{\text{пов}}}{w_0} \right)^b, \quad (3)$$

где  $T_{\text{пов}}$ ,  $T_{\text{гл}}$  – температура на глубине 5 и 50 см соответственно;  $W_{\text{пов}}$  – объёмная влажность в слое 0–6 см;  $w_0$ ,  $b$  – подбираемые константы. Основной трудностью, возникающей при вычислении эффективной температуры, является необходимость привлечения априорной информации о состоянии поверхностного слоя почв. Разработчики алгоритмов SMOS используют температурные данные, предоставляемые Европейским бюро среднесрочных прогнозов погоды. Однако эта информация для территории Сибири является ненадежной и, кроме того, платной.

Еще одной проблемой является определение зависимости КДП от влажности, которая различна для разных типов почв. Первоначально в алгоритме восстановления влажности SMOS использовалась модель КДП Добсона [4], в процессе тестирования которой обнаружились существ-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-05-98082-р\_сибирь\_а.

венные расхождения с экспериментальными данными. С 16 апреля 2012 г. в этом алгоритме используется более реалистичная модель Миронова [5], в которой входными параметрами для определения КДП на частоте 1,4 ГГц являются влажность, температура почвы и содержание в ней глины [6].

Причиной, побудившей нас разработать простой алгоритм обработки данных о яркостной температуре поверхности, имеющейся на уровне Level 1c, явился значительный разброс данных SMOS о яркостной температуре и влажности почвы. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость  $T_a$  от объемной влажности почвы  $W$ , построенная по данным SMOS, для пикселя с координатами  $54,56^\circ$  с.ш.,  $71,86^\circ$  в.д. (степной район Омской области) за период с 10 апреля по 15 мая и с 23 сентября по 1 ноября. В эти периоды почва находилась в талом состоянии при практическом отсутствии растительности, температура почвы изменялась от нуля до  $+20^\circ\text{C}$ , следовательно, в соответствии с (1) разброс значений яркостной температуры, соответствующих одной и той же влажности, вызванный колебаниями температуры почвы, не должен быть выше 10–20 К. Однако, как видно из рис. 1, по данным SMOS разброс составляет от 30 до 50 К. Наблюдаются также значительные вариации влажности при одной и той же яркостной температуре.

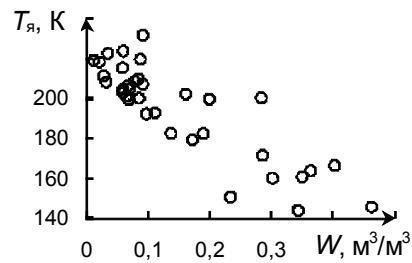


Рис. 1. Зависимость яркостной температуры от влажности почвы

В нашем алгоритме использовалось выражение (2). Как показал анализ данных Level 2, приводимые там значения эффективной температуры, используемые при расчётах влажности, незначительно отличаются от температуры воздуха на момент измерения (отличия не превышают 5 К), поэтому вместо использования выражения (3) эффективную температуру мы принимали равной температуре воздуха на момент измерения. Данные о температуре воздуха, измеренные метеостанциями на юге Омской области, мы получали из ресурса <http://meteo.infospace.ru>, созданного ИКИ РАН.

Поскольку угловые зависимости SMOS характеризуются значительным разбросом точек, мы аппроксимировали их полиномами второй степени. На первом этапе предполагалось, что  $N_p = 0$ , поэтому для определения  $h$  и коэффициента отражения с последующим определением влажности по диэлектрической модели [5] решалась система двух уравнений, записанных согласно (2) для двух углов зондирования на горизонтальной поляризации. В работе [3] показано, что приближение  $N_p = 0$  при решении прямой задачи дает погрешность вычисления яркостной температуры, не превышающую 2,5 К. Тестирование алгоритма показало, что при малых влажностях почв (не более 7 %) значения яркостной температуры, измеренные с помощью наземной радиометрической установки, описанной в [7], совпадают с данными SMOS с точностью 10 К. Расхождение можно объяснить тем, что приводимые на Level 1c значения яркостной температуры измерены в плоскости антенны спутника и не совпадают с результатами наземных измерений из-за влияния атмосферы [6].

При этом непосредственно измеренные значения влажности изменялись по глубине от  $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$  в слое 0–1 см до  $0,08 \text{ м}^3/\text{м}^3$  в слое 4–7 см, а средние значения, полученные с помощью нашего алгоритма, использующего данные о яркостной температуре SMOS, составили  $0,02$ – $0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . При больших влажностях почв результаты расчета в приближении  $N_p = 0$  существенно расходились как с данными SMOS, так и с результатами наземных измерений.

Далее предполагалось, что  $N_p \neq 0$ . В этом случае требовалось совместное решение трех уравнений, записанных, согласно (2), для трёх углов зондирования. Поскольку параметры  $h$  и  $N_p$  являются постоянными для отдельно взятой угловой зависимости, то путем решения системы можно найти эти два параметра и влажность почвы. Ниже приведена последовательность действий по этому алгоритму.

1. Провести анализ зависимостей  $T_{aH}(\phi)$  на горизонтальной поляризации, измеренных с помощью SMOS. При этом необходимо убедиться в отсутствии заведомо ложных значений яркостной температуры, которые превышают 300 К.
2. Построить сглаживающую функцию, аппроксимирующую зависимость  $T_{aH}(\phi)$  в диапазоне углов  $\phi$  от  $20$  до  $50^\circ$ , используя полиномы второй степени.
3. Используя аппроксимирующие полиномы, определить значения  $T_{aH}(\phi)$  для выбранных трёх углов зондирования. Эмпирически определено, что наилучшие результаты соответствуют углам зондирования  $37$ ,  $42$  и  $47^\circ$ . Это объясняется тем, что данные о  $T_a$  на Level 1c при углах зондирования вблизи  $42^\circ$  встречаются наиболее часто.

4. Найти значения квадратов модулей коэффициентов отражения от шероховатой поверхности для трех углов:

$$\left| r_{Hj} \right|^2 = \left( T_{yH}(\varphi_j) / T_{\text{воз}} \right) - 1, \quad (4)$$

где  $r_{Hj}$  – коэффициент отражения от шероховатой поверхности под углом зондирования  $\varphi_j$  на горизонтальной поляризации;  $T_{yH}(\varphi_j)$  – яркостная температура измеренная SMOS под углом зондирования  $\varphi_j$ ;  $T_{\text{воз}}$  – температура воздуха,  $j = 1, 2, 3$ .

5. Найти величину КДП почвы. Поскольку коэффициент отражения от шероховатой поверхности определяется выражением вида

$$\left| r_{Hj} \right|^2 = \left| r_{0Hj} \right|^2 \exp(-h \cos^{N_p} \varphi), \quad (5)$$

а параметры  $h$  и  $N_p$  не зависят от угла зондирования, представляется возможным выполнить следующие математические преобразования для трёх уравнений (5), записанных для трёх углов зондирования:

$$\begin{aligned} -h &= \ln \left( \frac{\left| r_{Hj} \right|^2}{\left| r_{0Hj} \right|^2} \right) \cdot \frac{1}{(\cos \varphi_j)^{N_H}} \quad (j=1, 2, 3); \\ \frac{\ln \left( \left| r_{Hj} \right|^2 / \left| r_{0Hj} \right|^2 \right)}{\ln \left( \left| r_{H(j+1)} \right|^2 / \left| r_{0H(j+1)} \right|^2 \right)} &= \left( \frac{\cos \varphi_j}{\cos \varphi_{(j+1)}} \right)^{N_H} \quad (j=1, 2); \\ \log \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \left( \frac{\ln \left( \left| r_{H1} \right|^2 / \left| r_{0H1} \right|^2 \right)}{\ln \left( \left| r_{H2} \right|^2 / \left| r_{0H2} \right|^2 \right)} \right) &= N_H; \quad \log \left( \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_3} \right) \left( \frac{\ln \left( \left| r_{H2} \right|^2 / \left| r_{0H2} \right|^2 \right)}{\ln \left( \left| r_{H3} \right|^2 / \left| r_{0H3} \right|^2 \right)} \right) = N_H; \\ \log \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \left( \frac{\ln \left( \left| r_{H1} \right|^2 / \left| r_{0H1} \right|^2 \right)}{\ln \left( \left| r_{H2} \right|^2 / \left| r_{0H2} \right|^2 \right)} \right) &= \log \left( \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_3} \right) \left( \frac{\ln \left( \left| r_{H2} \right|^2 / \left| r_{0H2} \right|^2 \right)}{\ln \left( \left| r_{H3} \right|^2 / \left| r_{0H3} \right|^2 \right)} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

В выражении (6) содержатся коэффициенты отражения по амплитуде на горизонтальной поляризации  $r_{0H1}$ ,  $r_{0H2}$  и  $r_{0H3}$ , определяемые из данных SMOS о яркостной температуре по формулам (4) и (5). С другой стороны, эти коэффициенты можно рассчитать, зная угол зондирования и КДП почвы, по формуле Френеля

$$r_{0Hj} = \frac{\cos \varphi - \sqrt{n^* \sqrt{n^* - \sin^2 \varphi}}}{\cos \varphi + \sqrt{n^* \sqrt{n^* - \sin^2 \varphi}}}, \quad (7)$$

где  $n^* = n - i\kappa = \sqrt{\epsilon^*}$  – комплексный показатель преломления;  $\epsilon^*$  – КДП почвы, действительная и мнимая части которой однозначно связаны с влажностью, температурой и гранулометрическим составом почвы диэлектрической моделью, приведенной в [5]. Гранулометрический состав почвы определяется с использованием почвенных карт, а температура почвы принимается равной температуре воздуха. Таким образом, уравнения (6) и (7) содержат одну неизвестную величину – влажность.

Как показало тестирование, в тех случаях, когда угловые зависимости SMOS близки к теоретическим, рассчитанным по уравнению (2), данные расчетов по нашему алгоритму практически совпадают с данными SMOS. На рис. 2, *a* представлена такая выборка из данных, приведенных на рис. 1, где 1 – результаты расчета по нашему алгоритму, 2 – данные SMOS. Видно, что разброс яркостных температур вполне соответствует ожидаемому. В 50–60 % случаев наш алгоритм дает нереальные значения влажности (либо меньше 0, либо больше 1), которые на рис 2, *a* не приводятся.

Анализ показал, что в этих случаях угловые зависимости SMOS являются более пологими, чем теоретические, т.е. яркостные температуры на горизонтальной и вертикальной поляризациях очень слабо зависят от угла зондирования. Для таких зависимостей уравнение (2) не является

справедливым. Возможно, что такие зависимости возникают из-за неправильного определения яркостных температур, так как, во-первых, измерения под разными углами зондирования аппаратом SMOS производятся при разных азимутальных углах; во-вторых, возможно влияние увеличения размеров пикселя при увеличении угла зондирования; в-третьих, возможны погрешности при пересчете первичных данных о яркостной температуре к сетке пикселей с неизменными координатами. Именно в таких случаях алгоритм SMOS часто дает неправильные значения влажности, не укладывающиеся на типичные радиационно-влажностные зависимости. Эти значения на рис. 2, *a* также не приводятся.

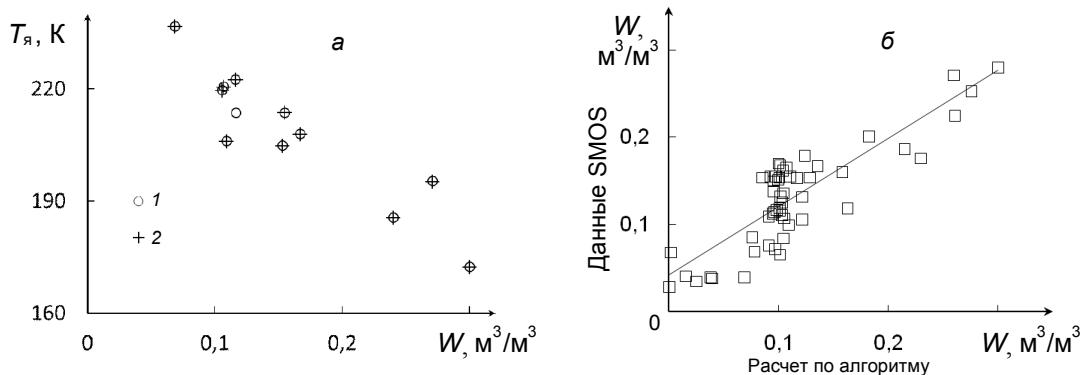


Рис. 2. Взаимосвязь результатов расчета по тестируемому алгоритму и данных SMOS

Таким образом, наш алгоритм позволяет выбирать из данных SMOS значения влажности, наиболее близкие к реальным.

Сравнение данных SMOS Level 2 о влажности и результатов расчетов по нашему алгоритму для этого же пикселя в период с 10 апреля по 1 ноября приведено на рис. 2 *б*. Поскольку наш алгоритм не учитывает влияние растительности, в вегетационный период расхождение результатов является более существенным.

В заключение отметим, что с 16 апреля 2012 г. действует новая версия V5.510 алгоритма SMOS восстановления влажности почв. Основными отличиями от предыдущих версий являются улучшение алгоритма обнаружения помех и применение диэлектрической модели Миронова вместо модели Добсона [6]. Алгоритм расчета яркостной температуры не изменился. Таким образом, приведенный выше анализ качества данных SMOS является актуальным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berger M., Camps A., Font J., and Kerr Y. H. // ESA Bulletin 111. – 2002. – 113f.
2. Wigneron J.-P., Chanz A., Kerr Y. H., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2011. – V. 49. – No. 4. – P. 1177–1187.
3. Escorihuela M. J., Kerr Y. H., Wigneron J.-P., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2007. – V. 45. – No. 7. – P. 1978–1987.
4. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – V. 23. – No. 1. – P. 35–46.
5. Mironov V. L. and Fomin S. V. // PIERS Online. – 2009. – V. 5. – No. 5. – P. 411–415.
6. URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sm0s> (дата обращения: 09.07.2012)
7. Бобров П.П., Миронов В.Л., Ященко А.С. // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 4. – С. 424–431.

\*Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

Поступила в редакцию 15.06.12.

\*\*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

\*\*\*Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

E-mail: x\_rays1@mail.ru