

3. Usoltsev A. A. *Vestnik NII SUVPT*. Krasnoyarsk, NII SUVPT, 2003, vol. 12, pp. 19–27.

4. Kleynen Dzh. *Statisticheskiye metody v imitatsionnom modelirovanii* (Statistical methods in simulation modeling), Moscow, Statistika, 2008, 306 p.

5. Tyupkin M. V. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii*. 2007, № 12, pp. 48–50.

6. Filippov V. A., Tsvirkun A. D. *Optimizatsionno-imitatsionnyye protsedury sinteza struktur raspredelennykh sistem upravleniya* (Optimization-simulation proce-

sure synthesis of structures of distributed control systems). Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2000, 284 p.

7. Filippov V. A., Tsvirkun A. D., Akinfiyev V. K. *Imitatsionnoye modelirovaniye pri sinteze struktur slozhnykh system* (Simulation of the synthesis of the complex system structure). Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2003, 428 p.

8. Kovalev I. V., Tyupkin M. V., Tsarev R. Yu., Tsvetkov Yu. D. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2007, № 3, pp. 73–74.

© Царев Р. Ю., Прокопенко А. В., Литошик С. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В., 2013

УДК 528.88

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ДАННЫХ СПУТНИКА SMOS ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Е. Г. Швецов¹, З. Ружичка², В. Л. Миронов^{2,3}

¹Институт леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28. E-mail: eugeneshvetsov@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: tramtara@seznam.cz

³Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

Представлены результаты корреляционного анализа влажности поверхности Земли по данным спутника SMOS и уровня пожарной опасности по условиям погоды, рассчитанного по данным наземных метеостанций, расположенных на территории Красноярского края. Для центральных и южных районов края между измеряемой влажностью поверхности и уровнем пожарной опасности получены значения коэффициентов корреляции, равные $-0,45...-0,7$. В то же время для северных районов края коэффициенты корреляции имели близкие к нулю или положительные значения. С использованием классификатора GLC2000 определены типы растительности в рассмотренных районах. Сделан вывод, что временные ряды влажности поверхности, полученные по данным спутника SMOS, удовлетворительно описывают динамику изменения уровня пожарной опасности только для территорий, занятых не лесными типами растительности.

Ключевые слова: спутник SMOS, влажность поверхности Земли, пожарная опасность.

INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF USING SMOS DATA FOR FIRE DANGER ASSESSMENT AT THE TERRITORY OF KRASNOYARSK REGION

E. G. Shvetsov¹, Z. Ruzicka², V. L. Mironov^{2,3}

¹Sukachev Institute of Forest of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

²Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: eugeneshvetsov@mail.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: tramtara@seznam.cz

³Kirensky Institute of Physics of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

The results of correlation analysis of soil moisture, according to SMOS satellite data, and fire danger index, calculated from data measured by weather stations, within the territory of Krasnoyarsk region are presented. For the central and southern parts of Krasnoyarsk region the values of correlation coefficients between soil moisture and fire danger were $-0.45...-0.7$. At the same time, correlation coefficients were close to zero or had positive values at the northern area of the region. Vegetation types were identified using GLC2000 classification. It was concluded that time series of soil moisture, obtained by satellite SMOS, satisfactory describe the dynamics of change of level of fire danger indices just for the territories covered by non-forest types of vegetation.

Keywords: satellite SMOS, soil moisture, fire danger.

Одна из важнейших задач противопожарного мониторинга – прогнозирование условий, определяющих возможность возникновения и распространения горения в лесах. Оценка пожарной опасности по условиям погоды в основном строится на анализе метеорологических параметров, регистрируемых метеостанциями. Основным недостатком данного метода оценки пожарной опасности – отсутствие регулярной сети метеостанций. Такая ситуация имеет место, например, в Сибири. Анализ существующей сети метеостанций показывает, что необходимо проводить интерполяцию в зоне до 100...150 км между метеостанциями, что накладывает ограничение на корректность картосхем распределения уровня пожарной опасности на всю территорию Сибири. Для решения этой задачи необходимо иметь возможность геопространственного анализа распределения показателей влажности лесных горючих материалов, который может быть выполнен только с привлечением данных дистанционного спутникового мониторинга.

В 2009 г. был запущен космический аппарат SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) Европейского космического агентства, оснащенный микроволновым радиометром, работающим на частоте 1,4 ГГц. Аппарат предназначен для мониторинга влажности поверхности суши и солености воды в Мировом океане. Полный охват всей поверхности Земли осуществляется с периодичностью 2...3 дня с пространственным разрешением порядка 43 км и точностью оценки объемного влагосодержания $0,04 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ [1].

За прошедшее с момента запуска аппарата SMOS время был проведен ряд исследований, направленных на проверку как продуктов уровня L1c (измерения радиояркостной температуры), так и уровня L2 (измерения влажности почвы) [2–4]. Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что уровень достоверности оценок влажности и радиояркостных температур, измеряемых SMOS, может различаться в зависимости от региона и времени года.

Основной целью данной работы являлся анализ применимости данных SMOS для оценки уровня пожарной опасности по условиям погоды на территории Красноярского края.

Методы исследования. Исследование заключалось в проведении временного и геопространственного анализа изменения влажности поверхности, а также сопряженный анализ показателей пожарной опасности по условиям погоды.

Для оценки влажности наземного покрова использовались измерения радиометра MIRAS, установленного на борту космического аппарата SMOS. В работе использовались данные SMOS уровня 2, содержащие оценки влажности поверхности. Влажность восстанавливается на основе измеренных космическим аппаратом угловых зависимостей радиояркостной температуры [5].

Индексы пожарной опасности по условиям погоды могут использоваться в качестве косвенной оценки влажности территории, так как они учитывают количество выпавших осадков и сумму температур воздуха, влияющую на скорость испарения влаги. Уровень пожарной опасности по условиям погоды характеризовался с помощью канадской системы CFFWIS (Canadian Forest Fire Weather Index System) [6] и рос-

сийского индекса пожарной опасности ПВ-1 [7]. Расчет этих индексов пожарной опасности требует наличия ежедневных метеорологических данных. Такие данные брались из сети метеостанций NOAA NCDC.

Используемая база данных содержит информацию о влажности поверхности и метеорологические данные за пожарные сезоны 2010–2012 гг. Район исследований включал в себя территорию Красноярского края, а также республик Хакасия и Тува.

Проведен корреляционный анализ временных рядов показателей пожарной опасности по условиям погоды и измерений влажности подстилающей поверхности по данным SMOS в окрестности метеостанций, расположенных на исследуемой территории.

Обсуждение результатов. Влажность поверхности и уровень пожарной опасности. Уровень пожарной опасности по условиям погоды оценивался с применением данных наземных метеостанций, расположенных на территории Красноярского края, республик Тува и Хакасия, за 2010–2012 гг. Использовались данные с 16 станций, расположенных по всей рассматриваемой территории.

В работе использовались индексы пожарной опасности канадской системы CFFWIS и российский индекс ПВ-1.

Канадская система оценки пожарной опасности по условиям погоды содержит коды влажности, описывающие влагосодержание трех комплексов растительных горючих материалов: тонких материалов верхних слоев лесной подстилки, материалов органического слоя подстилки и материалы уплотненного слоя оторфированной подстилки. Помимо этого система содержит индексы, описывающие поведение пожара. Итоговый индекс FWI – индекс пожарной опасности погоды [6]. Он рассматривался в данной работе.

Российский показатель влажности ПВ-1 является модификацией комплексного показателя горимости В. Г. Нестерова. При расчете данного индекса происходит ежедневное суммирование величины влагодефицита, выраженного разностью температуры воздуха и температуры точки росы. В случае выпадения осадков используется дифференцированный коэффициент, уменьшающий величину индекса.

Влажность подстилающей поверхности по данным спутника SMOS оценивалась по ближайшим к метеостанции территориям. Временной ряд данных SMOS формировался из ежедневных измерений, соответствующих узлам сетки данных SMOS, расположенным в радиусе 16 км от метеостанции. По значениям влажности в этих точках рассчитывалось среднее значение. Временные ряды формировались за период с 1 мая по 31 августа каждого года, т. е. за период максимальной пожарной активности.

В процессе анализа использовались данные только утренних проходов спутника SMOS. Это сделано, чтобы избежать ошибок, связанных с существенными различиями влажности, имеющими место между утренними и вечерними измерениями, которые могут наблюдаться даже в отсутствии осадков. На рис. 1 представлены значения влажности поверхности, измеренные SMOS во время утренних и вечерних проходов. Представлены измерения, сделанные в те дни, когда метеостанциями не регистрировалось выпадение осадков, т. е. значения влажности не должны были существенно различаться.

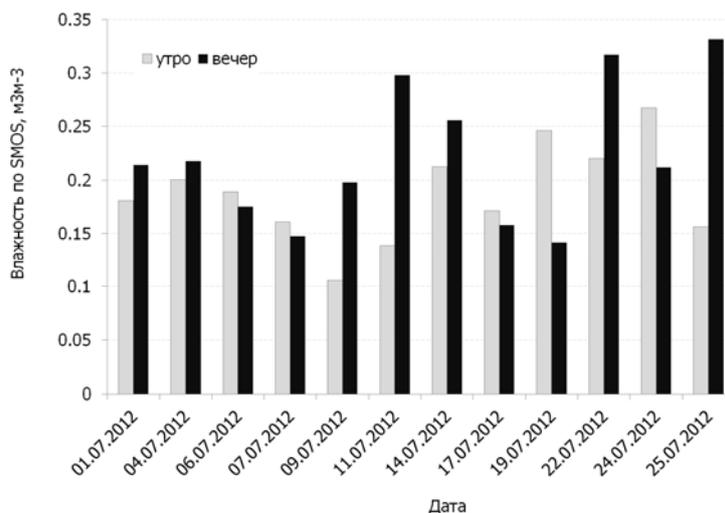


Рис. 1. Значение влажности, зафиксированные спутником SMOS, во время утренних и вечерних пролетов (примерно 06 и 18 часов по местному времени). Данные приведены для метеостанции Сым за те дни, когда выпадения осадков не регистрировалось

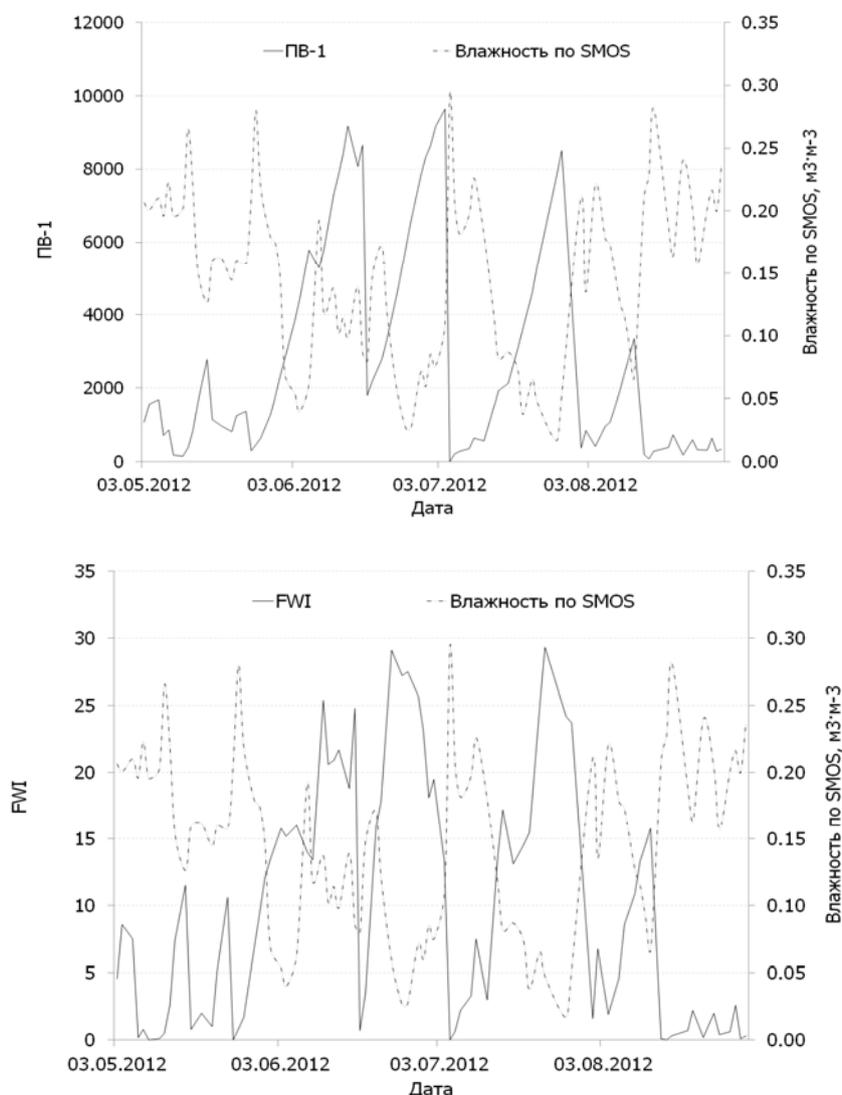


Рис. 2. Графики влажности поверхности для метеостанции Минусинск по данным SMOS и индекса ПВ-1 (вверху) индекса FWI (внизу). Исключены дни с отсутствующими измерениями влажности поверхности. Коэффициенты корреляции для индексов ПВ-1 и FWI составили $-0,71$ и $-0,82$, соответственно

Значения коэффициентов корреляции для метеостанций, расположенных в южных и западных районах Красноярского края, Туве и Хакасии

| Станция | Год | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ПВ-1 | | | FWI | | |
| | 2010 | 2011 | 2012 | 2010 | 2011 | 2012 |
| Эрзин | -0,50 | -0,50 | -0,40 | -0,63 | -0,68 | -0,38 |
| Кызыл | -0,59 | -0,64 | -0,39 | -0,56 | -0,70 | -0,57 |
| Таштып | -0,43 | -0,32 | -0,40 | -0,26 | -0,09 | -0,38 |
| Минусинск | -0,48 | -0,72 | -0,71 | -0,46 | -0,66 | -0,82 |
| Ермаковское | 0,07 | -0,27 | -0,41 | 0,12 | -0,05 | -0,39 |
| Ужур | -0,69 | -0,71 | -0,68 | -0,67 | -0,70 | -0,81 |

Однако фактические измерения влажности, сделанные в утренние и вечерние часы, могут отличаться иногда в два раза и более. При этом вечерние измерения обычно дают более высокие значения влажности. Подобные расхождения между утренними и вечерними наблюдениями также отмечаются в литературе, где в качестве возможных причин таких различий называются как проблемы технического характера, так и изменение объемного влагосодержания растительности [8].

Предварительный анализ также показал, что утренние измерения влажности дают наилучшую корреляцию с уровнем пожарной опасности по условиям погоды по сравнению с вечерними или средними за сутки значениями влажности.

Сопоставление временных рядов влажности поверхности и рассчитанных индексов пожарной опасности показало наличие связи между ними для южных и западных районов Красноярского края, Тувы и Хакасии. На рис. 2 представлены графики влажности поверхности и индексов пожарной опасности для метеостанции Минусинск для 2012 года.

Увеличение влажности почвы, регистрируемой спутником SMOS, сопровождалось снижением уровня пожарной опасности по условиям погоды, т. е. коэффициенты корреляции имели отрицательные значения (табл. 1).

При этом в большинстве случаев абсолютные значения коэффициентов корреляции для двух индексов пожарной опасности были примерно равны или коэффициенты для FWI были несколько выше, чем для индекса ПВ-1. Например, для метеостанции Минусинск значения коэффициентов корреляции между индексом ПВ-1 и влажностью наземного покрова составили -0,48, -0,72 и -0,71 для 2010, 2011 и 2012 гг. соответственно. В то же время коэффициенты корреляции между влажностью и канадским индексом FWI за соответствующие годы имели следующие значения: -0,46, -0,66 и -0,82. Похожая ситуация имела место и для других станций. Следует также отметить наличие межгодовых вариаций коэффициентов корреляции для рассмотренных метеостанций.

Можно выделить две метеостанции, Таштып и Ермаковское, на которых наблюдалась слабая зависимость между уровнем влажности, измеряемым спутником SMOS, и уровнем пожарной опасности. В ряде случаев наблюдались близкие к нулю или даже положительные значения.

Проанализированы типы растительного покрова вблизи рассмотренных метеостанций. В качестве карты растительности использована классификация GLC2000 (Global Land Classification), созданная в Объединенном исследовательском центре при Европейской комиссии по данным спутника SPOT4. Области исследования соответствует фрагмент для территории северной Евразии [9].

Можно отметить, что вблизи метеостанций, по которым наблюдаются более высокие абсолютные значения коэффициентов корреляции, преобладают главным образом, степи или сельскохозяйственные территории, т. е. территории с не лесными типами растительности. При этом в случае станций Таштып и Ермаковское растительный покров более неоднородный, с присутствием значительных лесных участков (рис. 3). Возможно, данный фактор оказывает влияние на наблюдаемые расхождения в динамике изменения индексов пожарной опасности и влажности наземного покрова, однако для более точного определения причин такого различия в значениях коэффициентов корреляции необходимы дополнительные исследования.

Аналогичная процедура сопоставления временных рядов измеренной влажности поверхности и индексов пожарной опасности проведена для нескольких метеостанций, расположенных в центральных и северных районах Красноярского края. В этом случае зависимости между указанными рядами были менее выражены. Если для метеостанций, расположенных в центральных районах края, значения коэффициентов корреляции еще были достаточно высокими, на уровне -0,5, превышая в ряде случаев -0,6, то для северных районов значения коэффициентов корреляции находились в районе нуля или были положительными (табл. 2).

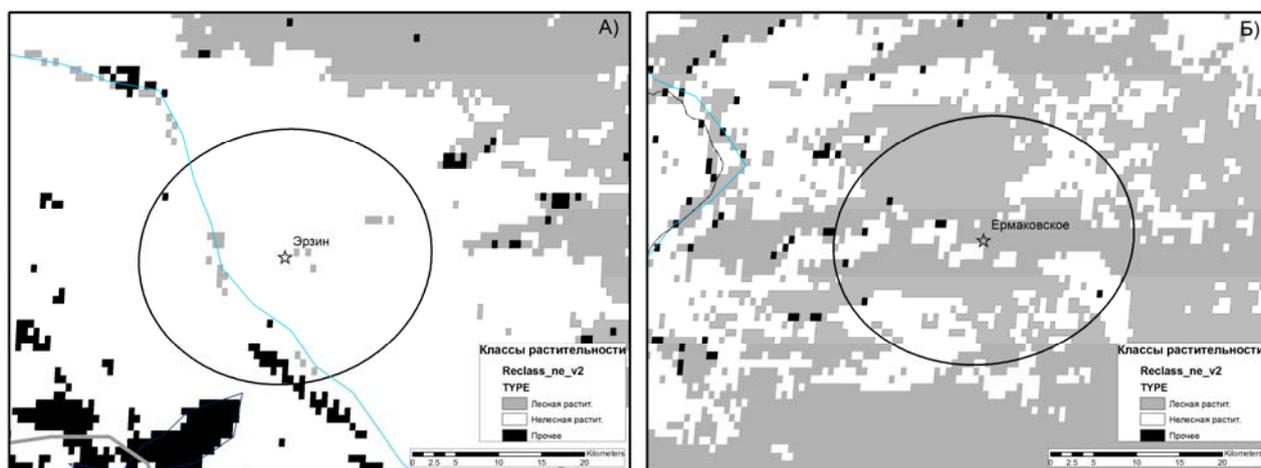


Рис. 3. Типы растительных покровов около метеостанций Эрзин (слева), Ермаковское (справа). В качестве карты растительности использована классификация Global Land Classification (GLC2000)

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции для метеостанций, расположенных в центральных и северных районах Красноярского края

| Станция | Год | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ПВ-1 | | | FWI | | |
| | 2010 | 2011 | 2012 | 2010 | 2011 | 2012 |
| Красноярск | -0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,53 | -0,34 | -0,64 |
| Колба | 0,21 | 0,26 | 0,40 | 0,32 | 0,42 | 0,43 |
| Агинское | -0,13 | -0,30 | -0,33 | 0,02 | -0,09 | -0,15 |
| Боготол | -0,10 | -0,24 | -0,56 | 0,13 | -0,05 | -0,57 |
| Канск | -0,36 | -0,67 | -0,52 | -0,16 | -0,65 | -0,61 |
| Большая Мурта | -0,25 | -0,49 | -0,45 | -0,11 | -0,42 | -0,48 |
| Енисейск | 0,11 | 0,42 | -0,02 | 0,16 | 0,48 | 0,17 |
| Богучаны | 0,20 | 0,39 | 0,01 | 0,27 | 0,56 | 0,20 |
| Ярцево | 0,18 | 0,33 | -0,07 | 0,27 | 0,38 | -0,01 |
| Сым | -0,33 | -0,04 | -0,18 | -0,29 | 0,04 | -0,19 |

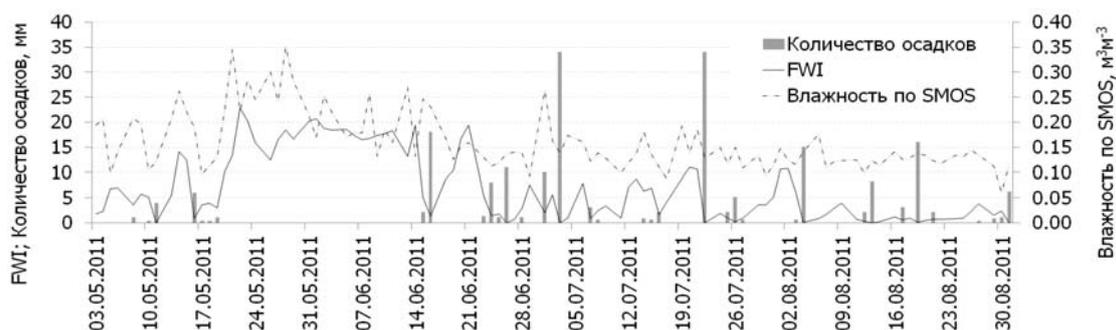


Рис. 4. Динамика индекса FWI и влажности подстилающей поверхности по данным SMOS для метеостанции Богучаны. Столбцами отмечено количество выпавших за день осадков

Для метеостанций, расположенных на территориях, покрытых лесом, имели место близкие к нулю или положительные значения коэффициента корреляции. Как видно из рис. 4, рост индекса пожарной опасности часто сопровождался ростом регистрируемой влажности. При этом даже выпадение значительного количества осадков не всегда приводило к заметному росту уровня влажности. В ряде случаев наблюдалось снижение влажности даже несмотря на выпадение

осадков. Это можно объяснить тем, что осадки выпадали уже после пролета спутника в этот день. Однако в последующие дни также не наблюдалось существенного увеличения уровня влажности, хотя значение индекса пожарной опасности падало до нуля. Подобные ситуации видны на графике в конце июля – августе.

Так же, как и в случае южных районов, достаточно хорошая зависимость между влажностью подстилающей поверхности и уровнем пожарной опасности

наблюдалась для метеостанций, расположенных на территориях, занятых, согласно классификатору типов наземных покровов GLC2000, сельскохозяйственными землями. К таким станциям можно отнести Красноярск и Канск. Более низкие абсолютные значения коэффициентов корреляции наблюдались для метеостанций Боготол и Большая Мурта. В окрестности этих станций присутствовали как сельскохозяйственные территории, так и лесные участки.

Результаты проведенного анализа данных по влажностному состоянию подстилающей поверхности, полученных с помощью спутника SMOS, показали возможность их использования для оценки уровня пожарной опасности по условиям погоды для южных и частично центральных районов Красноярского края. В этих районах преобладают такие типы подстилающей поверхности, как степи и сельскохозяйственные земли. Коэффициенты корреляции между временными рядами измерений влажности и индексов пожарной опасности имели значения на уровне $-0,5 \dots -0,7$.

В то же время для районов, в которых преобладают лесные типы растительности, динамика индексов пожарной опасности по условиям погоды уже не соответствовала изменению динамике влажности. Коэффициенты корреляции между этими временными рядами были близкими к нулю, а в ряде случаев и положительными. Такая ситуация наблюдалась главным образом в северных районах края. Это свидетельствует о том, что используемый в настоящее время алгоритм оценки влажности дает существенную погрешность для территорий, покрытых лесом.

Таким образом, данные спутника SMOS могут быть полезными при оценке уровня пожарной опасности на южных территориях, где преобладают не лесные типы наземного покрова. При этом на территориях с преобладанием лесов пока не удалось выявить зависимости, позволяющей выполнять оценку пожарной опасности по измерениям SMOS, хотя наибольший интерес такая оценка представляет именно для покрытых лесом территорий. Полученные в данной работе результаты подтверждают актуальность проблемы создания алгоритма восстановления влажности по данным SMOS на территориях, покрытых лесом.

References

1. 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., and Mecklenburg S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle, P. IEEE, 98, 2010, pp. 666–687.
2. Bircher S., Balling J. E., Skou N., and Kerr Y. H. Validation of SMOS Brightness Temperatures During the HOBE Airborne Campaign, Western Denmark, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1468–1482, doi:10.1109/tgrs.2011.2170177, 2012.
3. Jackson T. J., Bindlish R., Cosh M. H., Zhao T., Starks P. J., Bosch D. D., Seyfried M., Moran M. S., Goodrich D. C., Kerr Y. H., and Leroux D. Validation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Soil Moisture Over Watershed Networks in the US, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1530–1543, doi:10.1109/tgrs.2011.2168533, 2012.
4. Schlenz F., dall'Amico J. T., Mauser W., and Loew A. Analysis of SMOS brightness temperature and vegetation optical depth data with coupled land surface and radiative transfer models in Southern Germany, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 5389–5436, doi:10.5194/hessd-9-5389-2012, 2012.
5. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P., Davenport P., Ferrazzoli P., and Wigneron J.-P. SMOS level 2 Processor Soil Moisture Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) V 3.5, CBSA, UoR, TV and INRA, Toulouse, 2011.
6. Van Wagner C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Petawawa. Techn. Rep. 35. Ontario, 1987. 37 p.
7. Vonskij S. M., Zhdanko V. A., Korbut V. I., Semenov M. M., Tetjusheva L. V., Zavgorodnjaja L. S. *Opredelenie prirodnoj pozharnoj opasnosti v lesu* (Determination of natural fire danger in the forest). Leningrad, LenNILH, 1975, 40 p.
8. Rowlandson T. L., Hornbuckle B. K., Bramer L. M., Patton J. C. and Logsdon S. D. Comparisons of Evening and Morning SMOS Passes Over the Midwest United States, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1544–1555, doi:10.1109/tgrs.2011.2178158, 2012.
9. Bartalev S. A., Erchov D. V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia. International Journal of Remote Sensing. 2003, vol. 24, № 9. pp. 1977–1982.

© Швецов Е. Г., Ружичка З., Миронов В. Л., 2013