

УДК 551.509.5

Процедура контроля качества данных спутниковых измерений влажности почвы

Н.Н. Богословский, Л.И. Кижнер, И.А. Бородина, Д.С. Рудиков,
С.И. Ерин, К.А. Алипова*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Влажность почвы имеет большое значение при решении задач гидрологии, экологии, климатологии и сельского хозяйства, так как определяет водный и тепловой режим почвы и влияет на приземные слои атмосферы. В настоящее время оценить влажность почвы можно с использованием систем дистанционного зондирования Земли.

Приведена оценка получаемой спутниковой продукции и выявлены закономерности, аномалии и причины их появления. Представлено сравнение данных спутниковых измерений за теплый период 2011–2012 гг. с прямыми измерениями влажности почвы на пяти сетях метеорологических станций на территории США.

Показана удовлетворительная связь между двумя видами измерений, выявлены районы с хорошей и неудовлетворительной зависимостью и возможные причины рассогласованности данных. Полученные данные могут быть использованы в других географических районах с однотипными подстилающими поверхностями и орографией. Предложены критерии для процедуры контроля качества спутниковых данных измерений.

Ключевые слова: влажность почвы, спутниковые наблюдения, сети наблюдений за влажностью почвы, численные прогностические модели атмосферы; soil moisture, the satellite observation, the observation network on soil moisture, atmospheric numerical forecasting model.

Введение

Влажность почвы определяет водный и тепловой режим почвы и прилегающих слоев атмосферы. Наблюдения за изменением влажности почвы имеют большое значение в различных исследованиях: гидрологических (прогнозирование стока, раннее предупреждение наводнения), экологических (прогнозирование эрозии почвы), климатических (мониторинг засухи), а также для сельского хозяйства (планирование орошения). В гидрометеорологических моделях влажность почвы используется в качестве начальных и граничных условий. Правильный учет запасов влаги в почве оказывает существенное влияние на точность численных прогнозов погоды. В работе [1] рассматривается усвоение данных измерений влажности почвы ASCAT (Advanced Scatterometer) в глобальной модели численного прогноза погоды английской метеослужбы, с 2010 г. усвоение этих данных проводится в оперативном режиме. Использование спутниковых данных влажности почвы в системе усвоения данных позволило

улучшить прогноз влажности почвы, приземной температуры воздуха и относительной влажности. В работе [2] представлено исследование по усвоению спутниковых данных влажности почвы ASCAT с применением расширенного фильтра Калмана в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды. Использование спутниковых данных позволило более точно задать начальные значения влажности поверхностного слоя почвы, что повлияло на точность расчетов влажности почвы.

В связи с возрастающей ролью спутниковой информации для изучения природной среды возникает задача валидации наблюдений и разработки алгоритмов и процедур контроля качества спутниковых измерений, в том числе изменений влажности почвы.

Первый космический скаттерометр С-диапазона был запущен со спутником дистанционного зондирования Земли ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite), произведенным Европейским космическим агентством для осуществления высокоточных измерений при наблюдении за поверхностью Земли и ее атмосферой для обеспечения экологического мониторинга. Аппарат был запущен в 1991 г. ERS-2 – последователь ERS-1 – был запущен в 1995 г. Оба скаттерометра на борту ERS-1 и ERS-2 – активные микроволновые приборы, работающие на частоте 5,255 ГГц. Расширенный скаттерометр (ASCAT) является новым поколением на борту метеорологической оперативной (MetOp) серии спутников [3].

* Николай Николаевич Богословский (bnn@math.tsu.ru); Любовь Ильинична Кижнер (kdm@mail.tsu.ru); Ирина Андреевна Бородина (bia_5@mail.ru); Дмитрий Сергеевич Рудиков (dumkaonoff@gmail.com); Сергей Игоревич Ерин (sergei.erin@mail.ru); Ксения Александровна Алипова (ksusha_ast@mail.ru).

Спутниковые измерения влажности почвы с использованием измерительной системы MetOp–ASCAT проводятся с 2007 г. [4]. К настоящему времени опубликованы работы, посвященные сравнению спутниковых и прямых наблюдений, выполняемых на станциях, для разных районов земного шара. Так, в [5] представлены результаты для территории США, Европы, Центральной Азии, западной части экваториальной Африки, юга Австралии. Оценено качество данных по почвенному индексу влаги (soil water index, это величина, характеризующая влажность почвы в прикорневых слоях на глубинах в десятки сантиметров по данным измерений спутника, который оценивает влажность в самом верхнем слое до 1–3 см) [6] за период 2007–2011 гг. по 664 станциям (23 наземные наблюдательные сети). Получено, что среднее значение коэффициентов корреляции Пирсона составило 0,54 на 64,4% рассмотренных временных рядов. Для территории США использованы три наземные наблюдательные сети. В [7] выполнено сравнение изменчивости влажности почвы для территории Аляски и северной части России за период с 2002 по 2013 г. с помощью сканирующих радиометров на радиочастотах 50 и 70 МГц (системы наблюдений AMSR-E на борту спутника NASA-Aqua и AMSR2 на борту спутника Global Change Observation Mission 1 – Water (GCOM-W1)).

Целью настоящей работы является оценка качества получаемой спутниковой продукции по влажности почвы при сопоставлении с данными наземных наблюдательных сетей; выявление закономерностей, аномалий, а также разработка процедуры контроля качества спутниковых данных измерений для системы усвоения данных глобальной модели численного прогноза погоды ПЛАВ [8]. Работа является продолжением исследований, опубликованных в [9]. В данной статье большое внимание уделено выбору наблюдений с учетом более жестких требований к синхронности данных спутниковых и прямых наблюдений по времени и пространству, увеличен объем наблюдений. При обработке спут-

никовых данных измерений был применен фильтр Калмана [10].

Для сравнения выбрана территория США, на ней расположено большое количество станций наблюдения за влажностью почвы, объединенных в сети. В качестве спутниковых измерений были использованы данные [11], полученные с использованием скаттерометра ASCAT, установленного на спутниковых системах MetOp. В статье представлены обработанные данные за 2011 и 2012 гг.

Прямые наблюдения на станциях

При проведении сравнений использованы пять сетей наблюдений, охватывающих всю территорию США. Во всех сетях наблюдательных станций используется однотипная методика измерений. Для измерения влажности почвы применяются преимущественно различные модификации приборов Hydromete, принцип их действия схож. Зонды установлены в вертикальном профиле на разных глубинах. Каждая станция передает данные ежечасно на геостационарный спутник. Диэлектрическая проницаемость почвы преобразуется в объемные единицы влажности почвы ($\text{м}^3/\text{м}^3$) путем использования уравнения калибровки. Система обеспечивает высокую точность измерений и надежность передачи данных [12]. В работе использована объемная масса влаги в почве на глубине от 5 до 10 см в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Всего учтено 555 станций за 2011 г. и 508 станций за 2012 г. [13]. Среднее количество измерений, приходящихся на одну станцию, составляет 175 (минимальное количество – 52).

Станции расположены в различных климатических зонах. Для привязки наблюдений к разным типам ландшафтов была проведена работа по классификации станций по типу растительности в соответствии с классификацией IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) (табл. 1), определяющей режим почв [14].

Таблица 1

Типы растительности на подстилающей поверхности

Тип	Оригинальное название	Перевод
1	ENF: Evergreen Needleleaf Forests	Вечнозеленые хвойные леса
2	EBF: Evergreen Broadleaf Forests	Вечнозеленые широколиственные леса
3	DNF: Deciduous Needleleaf Forests	Листопадные хвойные леса
4	DBF: Deciduous Broadleaf Forests	Листопадные широколиственные леса
5	MF: Mixed Forests	Смешанные леса
6	CSH: Closed Shrublands	Закрытые с кустарником
7	OSH: Open Shrublands	Открытые с кустарником
8	WSA: Woody Savannas	Лесистая саванна
9	SAV: Savannas	Саванна
10	GRA: Grasslands	Луг
11	WET: Permanent Wetlands	Постоянные водно-болотные угодья
12	CRO: Croplands	Пахотные земли (пахотные угодья)
13	URB: Urban and Built-Up Lands	Урбанизированные и застроенные земли
14	Crop/Mosaic	Пахотные земли с мозаичными культурами
15	SNO: SnowandIce	Снег и лед
16	BSV: Barren or Sparsely Vegetated (Bare Soil and Rocks)	Неплодородные почвы или с редкой растительностью (голая почва и горные породы)
17	Water	Водная поверхность
18	Tundra	Тундра

Измерения влажности с помощью спутника и обработка совместных наблюдений

Спутники серии MetOp оснащены современными системами дистанционного зондирования Земли. Важным прибором, имеющимся на спутнике, является скаттерометр ASCAT. ASCAT – импульсная радиолокационная станция, работающая в С-диапазоне на частоте 5,255 ГГц; скаттерометр производит измерения сверхвысокой частоты обратного рассеяния двумя наборами из трех антенн. В каждой точке пространства набор из трех антенн производит три совместных измерения обратного рассеяния при углах падения в диапазоне от 25 до 65° [4, 15]. Прибор ASCAT работает на длине волны 5,7 см (С-диапазон). Принцип действия прибора основан на сильной зависимости С-диапазона обратного рассеяния от содержания влаги в верхнем слое почвы. Для получения значений влажности почвы мгновенные измерения обратного рассеяния ASCAT экстраполируются и приводятся к опорной частоте с поправкой на сезонные влияния растительности. Затем измерения сравниваются с эквивалентными значениями для «сухих» и «влажных» сигналов обратного рассеяния. В результате сравнения временных рядов оценивают содержание влаги в относительных единицах в диапазоне от 0 (сухая) до 100 (насыщенная) для слоя почвы глубиной до 5 см. При дистанционном определении влажности почвы возникает множество факторов, ухудшающих связь. Это влияние различных поверхностей, отсутствие связи для замерзших почв, наличие растительного покрова, пространственное разрешение спутников, особенно в сочетании со сложным рельефом. В [16] показано, что слоистая структура влажности почвы оказывает существенное влияние на поведение радиояркой температуры.

Пространственное разрешение прибора составляет 25 км, ожидаемая средняя ошибка – порядка 25%, что соответствует примерно 0,03–0,07 м³/м³.

Влажность почвы может существенно изменяться на расстоянии в несколько десятков километров даже при однородной подстилающей поверхности за счет осадков.

В численных прогностических моделях и на наземных станциях наблюдений используется объемная влажность (м³/м³), поэтому необходимо преобразовать спутниковые данные о влажности в абсолютные значения. Для этого была применена линейная зависимость, предложенная в работе [1].

Для проведения сравнения данные прямых измерений и наблюдений со спутников согласовывались по времени. Различие по времени не превышало 30 мин. В связи с тем что координаты точек спутниковых измерений не совпадают с координатами станций, для сравнения отбирались спутниковые точки измерений, наиболее близко расположенные к станциям. Расстояние между точками спутниковых измерений и станций не превышало 5 км. После выбора согласованных данных к спутниковым измерениям применялся фильтр Калмана.

Обсуждение результатов

Использованы синхронные (по времени и пространству) данные прямых наблюдений на станциях и спутниковых наблюдений за теплый период года (когда почва незамерзшая). Результаты, отражающие связь между двумя видами измерений, за 2011 и 2012 гг. аналогичны.

На рис. 1 представлена исследуемая территория, на которой отмечены значения коэффициентов корреляции r для спутниковых и станционных наблюдений. Разные символы соответствуют различным диапазонам коэффициента корреляции r . Интервалы r выбраны в соответствии с общепринятыми градациями [17]. Второе число в каждой градации включено в нее.

Видно, что на всей территории встречаются станции с различной корреляцией, включая и отрицательную.

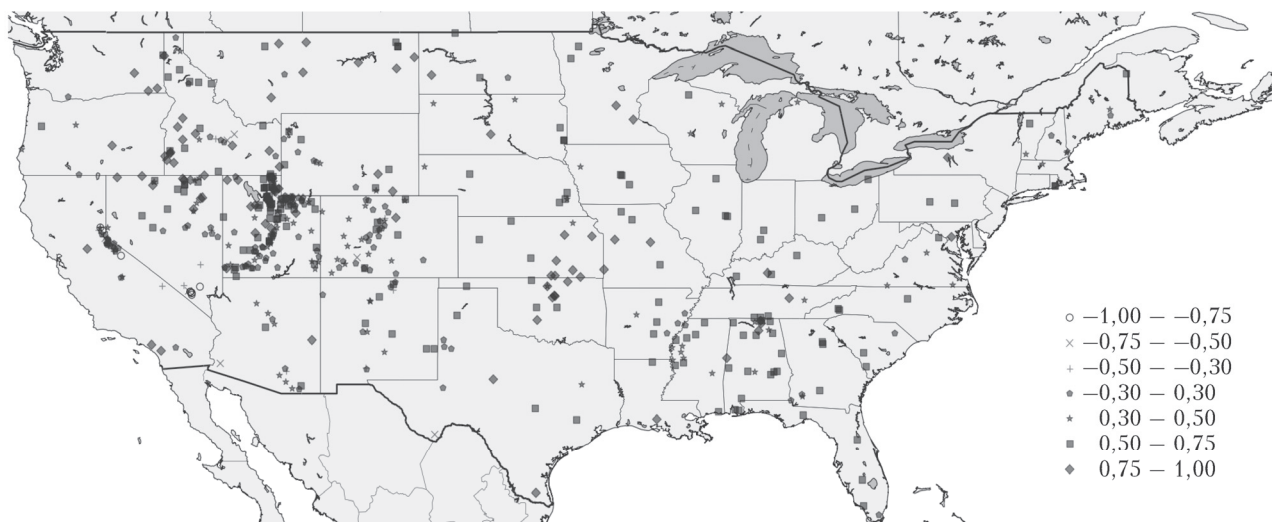


Рис. 1. Карта с точечным представлением корреляции спутниковых данных с наземными наблюдениями (2011 г.)

Анализ визуальной оценки отдельных станций с использованием карт спутниковых снимков подстилающей поверхности показал, что близость к водохранилищам, озерам, а также к территориям с резко изменяющейся альтитудой и сложным рельефом вызывает увеличение шума и ухудшение корреляционной зависимости между массивами спутниковых и прямых наблюдений.

На большей части территории коэффициент корреляции выше 0,5. Это преимущественно районы, простирающиеся с северо-запада на юго-восток страны. Наиболее неблагоприятные области применения спутниковых данных — район Невады и юго-запад страны, которые имеют высокую топографическую сложность наряду с засушливым пустынным и полупустынным климатом и сезонным ритмом дождей, а также большой сетью пересохших речных систем, время от времени заполняющихся водой при осадках.

На рис. 2 представлена связь между прямыми и спутниковыми наблюдениями для разных типов подстилающей поверхности. Номер типа соответствует данным табл. 1. Меньшее расхождение в данных двух видов наблюдений отмечается для лесистых саванн, вечнозеленых хвойных лесов, лугов, пахотных земель (типы 8, 1, 10, 12). Это в целом однородные поверхности.

По данным за два года наихудшие связи отмечаются для открытых местностей с кустарником (тип 7), а также водно-болотных угодий (тип 11). Для пустынных районов (голая почва и горные породы, 16 тип) всегда наблюдалась отрицательная корреляция, однако эти выводы не являются статисти-

чески достоверными, так как станций с таким типом ландшафта мало.

Обобщенные данные по всем станциям представлены на рис. 3. Видно, что у большинства станций корреляция выше 0,5, при этом наибольшее количество станций имеют корреляцию в пределах от 0,6 до 0,8.

Можно заключить, что в 50% случаев корреляция выше 0,51 (2012 г.) — 0,52 (2011 г.). При группировке 39% станций дают корреляцию выше 0,7. В табл. 2 представлены некоторые статистические характеристики по корреляционной связи спутниковых и прямых наблюдений.

Таблица 2

Краткая статистика всей выборки по корреляции

Год	Количество станций	Медиана	Минимум	Максимум
2011	555	0,52	-1,00	0,93
2012	506	0,51	-0,91	0,95

Важным параметром, характеризующим взаимосвязь между рядами данных, является относительная погрешность. Она учитывает как абсолютную погрешность оценки, так и фактические средние значения влажности.

На рис. 4 представлены поля разных значений относительной погрешности оценки влажности почвы по спутниковым данным.

На большей части территории, простирающейся с юго-востока на северо-запад страны, относительная погрешность оценки влагосодержания почвы не превышает 40%. Территория характеризуется

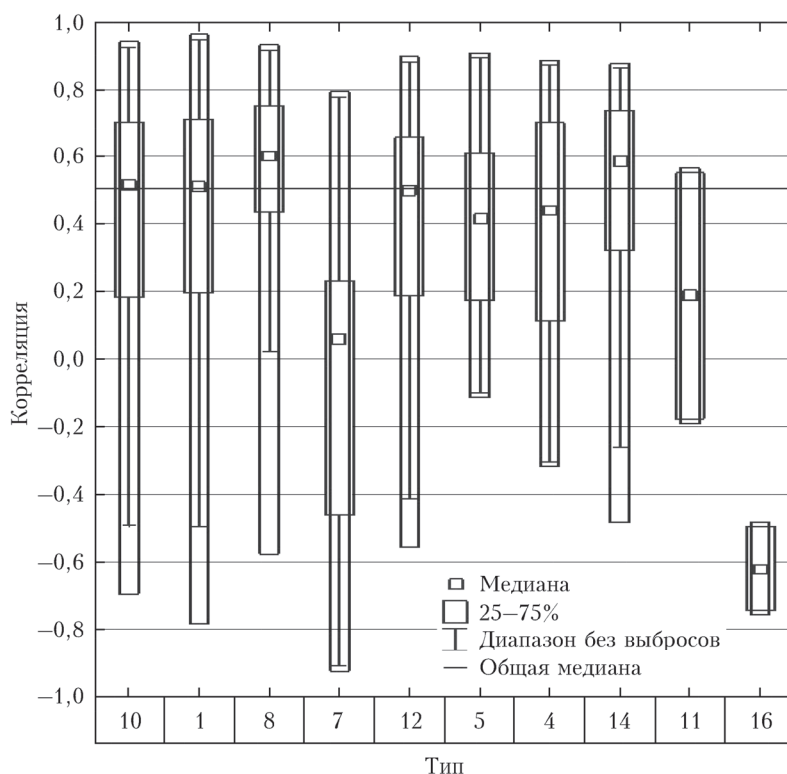


Рис. 2. Зависимость корреляции данных от типа ландшафта (2011 г.)

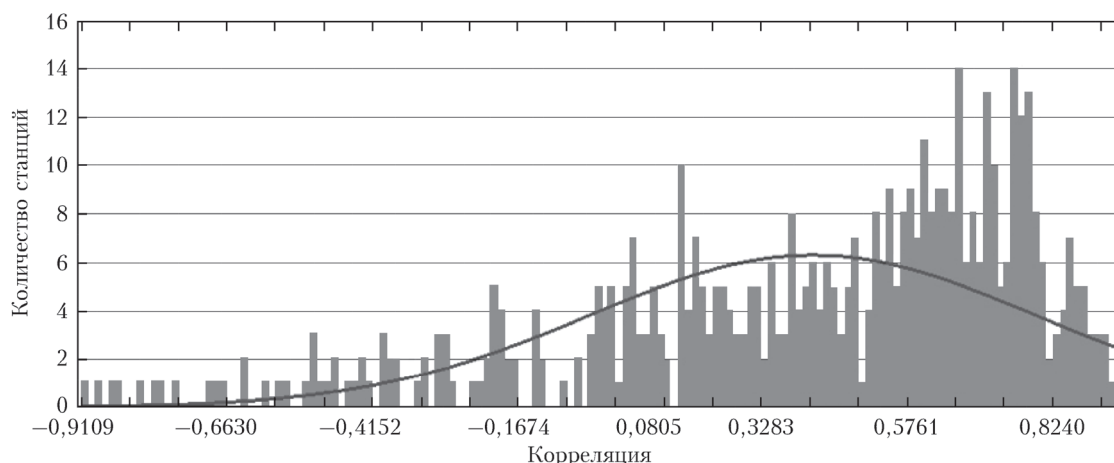


Рис. 3. Гистограмма распределения корреляционной зависимости для всех выбранных точек сетей (2012 г.)

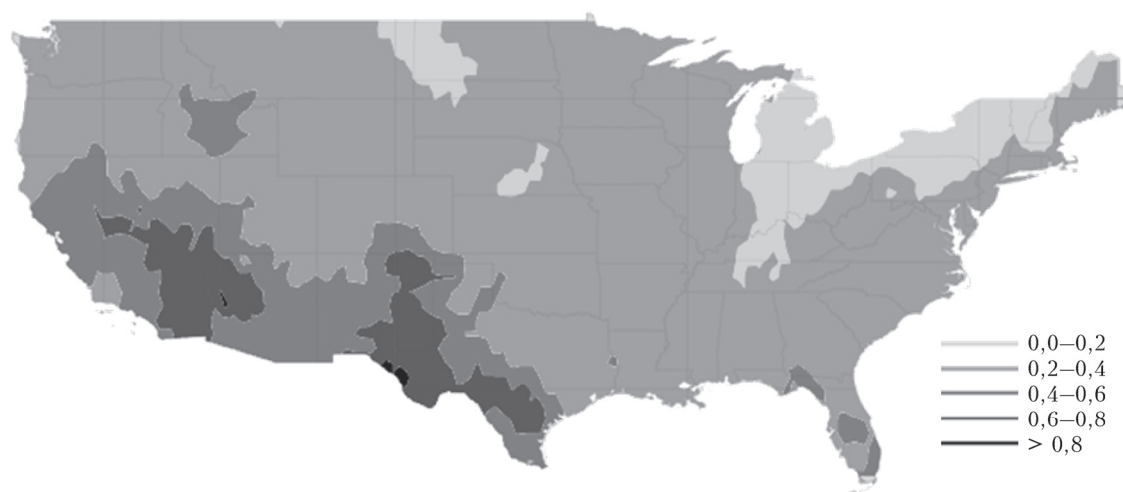


Рис. 4. Относительная ошибка восстановленных спутниковых данных (2011 г.)

постепенным повышением местности от низменности (на юго-востоке) до предгорного плато Великих Равнин на западе и северо-западе, имеющих высоты до 1800 м. В аналогичном порядке чередуются зоны влажных вечнозеленых лесов, лесостепей и прерий, степей.

Наименьшая погрешность характерна для северо-восточных районов, характеризующихся теплым летом с достаточным увлажнением, занятых преимущественно пахотными землями. Район отличается ровным рельефом с высотой 200–500 м над уровнем моря.

В засушливых районах юго-западной части территории относительная погрешность может достигать 80% и более. Это можно объяснить засушливостью климата на юге, юго-западе США — значения влажности почвы настолько низки, что находятся на уровне шума для скаттерометра. Большая относительная погрешность обусловлена также топографической сложностью территории. Помимо этого болотистые территории Флориды тоже имеют ошибки в половину от стационарных значений.

Соотношения, полученные для территории США, могут быть распространены и на территорию Рос-

сии, на регионы, имеющие сходные типы подстилающих поверхностей.

По результатам исследования в алгоритм контроля качества данных измерений были заложены следующие критерии.

1. Контроль данных измерений на основе служебных данных спутниковых измерений о состоянии почвы (замерзшая почва или нет).

2. Использование данных измерений, проводимых в местностях в соответствии с классификацией IGBP, обладающих высоким коэффициентом корреляции и низкими ошибками.

3. Исключение измерений в областях со сложным рельефом.

Заключение

Результаты сравнения данных по влажности поверхностного слоя почвы с использованием прибора ASCAT показали удовлетворительную согласованность с реальными данными прямых измерений влажности, выполняемых на станциях.

Удовлетворительную зависимость ($r > 0,5$) имеют 51–52% станций. Погрешность спутниковых

наблюдений зависит от степени однородности подстилающей поверхности в точках сравнения. Самая тесная связь и наименьшая относительная ошибка характерны для станций с типом растительности луг, пахотные земли, саванны. Точки сравнения имеют однотипную поверхность.

Самую слабую связь и большую относительную ошибку имеют станции с типом растительности открытая местность с кустарником. Точки сравнения с плохой зависимостью имеют неоднородную подстилающую поверхность, различия могут быть в рельефе, растительном покрове. Они располагаются в горных, предгорных и пустынных районах.

В большинстве случаев абсолютная ошибка по всем станциям не превышает $0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Таким образом, на основе проведенного исследования может быть предложена предварительная процедура контроля качества спутниковых измерений влажности почвы, которая может повысить качество входных данных для системы усвоения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-6896.2015.5.

1. Dharssi I., Bovis K., Macpherson B., Jones C. Operational assimilation of ASCAT surface soil wetness at the Met Office // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011. V. 15, iss. 8. P. 2729–2746.
2. Drusch M., Scipal K., Rosnay K., Balsamo G., Anderson E., Bougeault P. Towards a Kalman Filter based soil moisture analysis system for the operational ECMWF Integrated Forecast System // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L10401.
3. Naeimi V., Bartalis Z., Wagner W. ASCAT soil moisture: An assessment of the data quality and consistency with the ERS scatterometer heritage // J. Hydrometeorol. 2009. V. 10, N 2. P. 555–563.
4. Bartalis Z., Naeimi V., Hasenauer S., Wagner W. ASCAT Soil Moisture Product Handbook // ASCAT Soil Moisture Report Series. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria. 2008. N 15. P. 1–22.
5. Paulik C., Dorigo W., Wagner W., Kidd R. Validation of the ASCAT soil water index using *in situ* data from the International Soil Moisture Network // Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. 2014. V. 30. P. 1–8.

6. Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp H., Figa J., Anderson C. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. P. L20401.
7. Muskett R.R., Romanovsky V.E., Cable W.L., Kholodov A.L. Active-layer soil moisture content regional variations in Alaska and Russia by ground-based and satellite-based methods, 2002 through 2014 // Int. J. Geosci. 2015. V. 6. P. 12–41.
8. Tolstykh M.A., Geleyn J.F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Kostykin S.V., Mizyak V.G., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Shlyayeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // Russian Meteorol. Hydrol. 2015. V. 40, N 6. P. 374–382.
9. Бородина И.А., Кижнер Л.И., Богословский Н.Н., Ерин С.И., Рудиков Д.С. Сравнение спутниковых данных измерений влажности почвы ASCAT с прямыми измерениями // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 380. С. 181–184.
10. Kalman R., Bucy R. New results in linear filtering and prediction theory // J. Basic Engin. 1961. N 83. P. 95–108.
11. Remote Sensing Group. URL: <http://rs.geo.tuwien.ac.at/remote-sensing/>
12. U.S. Climate Reference Network. National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Centers for Environmental Information. URL: http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/ucsr/documentation/site/sensors/soil/Descriptions/Soil_StevensHydra-SDI-12.pdf
13. International Soil Moisture Network. URL: <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>
14. IASI/AVHRR Visual Scenes Analysis and Cloud Detection. EUMETSAT. URL: <http://www.brockmann-consult.de/iavisa-info-web/data-set-generation.html>
15. Полярно-орбитальная спутниковая система MetOp. Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета». URL: http://planet.iitp.ru/spacecraft/metop_rus.htm
16. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Дымбрылов Ж.Б., Раднаева С.Б. Радиояростная температура земных покровов, измеренная микроволновым радиометром SMOS, и задача восстановления влажности почвы // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 605–609.
17. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.

N.N. Bogoslovskii, L.I. Kizhner, I.A. Borodina, D.S. Rudikov, S.I. Erin, K.A. Alipova. Quality control of satellite soil moisture measurements.

Soil moisture determines water and thermal regimes of the soil and the surface boundary layer of the atmosphere. It is an important factor in hydrology, ecology, climatology, meteorology, and agriculture. Nowadays, soil moisture is mostly measured with satellite remote sensing systems.

The data measured by a satellite during the warm period of 2011–2012 years has been compared with data direct measured at 5 networks of weather stations in the USA. The aim of this study is evaluation of the soil moisture satellite data, finding regularities, anomalies and their causes, and development of satellite data quality control procedure for data assimilation system. Satisfactory agreement between two kinds of data observed has been shown. Areas with good and poor dependence were identified. These results can be used in other regions with similar underlying surfaces and orography. Criteria for satellite data quality control procedures are proposed.