

Моделирование составляющих водного и теплового балансов для части Центрально-Черноземной зоны Европейской территории России с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности

Е.Л. Музылев¹, А.Б. Успенский², З.П. Старцева¹

¹ *Институт водных проблем РАН*

Москва, 119333, ул. Губкина, 3. E-mail: muzylev@aqu.laser.ru

² *ГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»*

Москва, 123242, Б. Предтеченский пер., 7. E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Представлены результаты моделирования составляющих водного и теплового балансов с использованием построенных по спутниковым данным полей температуры подстилающей поверхности (ТПП) и параметров растительного покрова для трех вложенных один в другой участков территории Центрально-Черноземной зоны Европейской части России площадью 23500, 52800 и 227300 км² для сезонов вегетации 2003-2009 гг. Спутниковые оценки характеристик подстилающей поверхности были получены с помощью разработанных технологий по данным радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/ EOS Terra и Aqua и SEVIRI/Meteosat-9. Описаны методы усвоения этих продуктов дистанционного зондирования в модели вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера» (SVAT), предназначенной для расчета вертикальных потоков тепла и влаги, влаго- и теплосодержания почвы, ТПП и температуры почвы.

Ключевые слова: составляющие водного и теплового балансов, модель влаго- и теплопереноса, тематическая обработка спутниковых данных, пространственная изменчивость характеристик подстилающей поверхности

Введение

Значительный интерес, проявляемый в настоящее время к выявлению закономерностей формирования водного и теплового режимов территорий регионального масштаба, обуславливает постоянное совершенствование методов моделирования процессов водо- и теплообмена этих территорий с атмосферой. Основные направления такого совершенствования – это модификация структуры моделей типа SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer), разработка новых параметризаций упомянутых процессов, учет пространственной изменчивости характеристик подстилающей поверхности (ПП), привлечение новых видов информации (например, спутниковой) для информационного наполнения моделей.

В рамках подобного подхода основными целями работы являлись: 1) развитие и усовершенствование технологий получения оценок характеристик ПП (температур поверхностей растительного покрова T_a и почвы T_{sg} , эффективной радиационной температуры поверхности $T_{s,eff}$ (средневзвешенной температур T_a и T_{sg}), индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью B) по данным AVHRR/NOAA при безоблачной атмосфере, ТПП и LAI по данным MODIS/Terra и Aqua, а также разработка технологии определения ТПП по данным SEVIRI/Meteosat-8, -9; анализ достоверности этих оценок; 2) разработка способов использования спутниковых оценок названных характеристик в качестве параметров или входных переменных модели SVAT, в том числе создание и отладка процедур учета в модели пространственной неоднородности полей этих оценок, а также определяемых по данным наземных наблюдений метеорологических характеристик; 3) получение с помощью адаптированной к спутниковым данным модели SVAT оце-

нок составляющих водного и теплового балансов для вложенных один в другой участков территории Центрально-Черноземной зоны Европейской части России площадью 23500, 52800 и 227300 км² (49°30' – 54° с.ш., 31° – 43° в.д.) для сезонов вегетации 2003-2009 гг. На территории этих участков расположены, соответственно, 7, 13 и 48 агрометеостанций, данные наблюдений на которых использовались при расчетах по модели.

Краткое описание методов получения спутниковых оценок характеристик подстилающей поверхности и модели SVAT

Методы и алгоритмы тематической обработки и анализа спутниковых данных радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и Aqua для построения оценок характеристик ПП подробно описаны в (Музылев и др., 2002, 2005, 2010). Технологии получения оценок T_{sg} , T_a , $T_{s,eff}$, E, NDVI, B, LAI по данным AVHRR адаптированы применительно к обширной исследуемой территории части ЦЧР России. За счет расширения территории и увеличения объема обучающих выборок в сезоны вегетации 2008-2009 гг. уточнены регрессионные алгоритмы и получены оценки названных величин за разные даты этих сезонов для всего региона. Для анализа достоверности данных спутникового зондирования проанализирована статистика ошибок определения T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ (путем сравнения с результатами наблюдений in-situ на агрометеостанциях региона). Среднеквадратические отклонения (СКО) для T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ составили в эти сезоны, соответственно, 2,3-2,7, 3,7-4,9 и 2,4-3,5°С. Файлы с оценками ТПП T_{ls} , NDVI, LAI и E по данным MODIS были получены через веб-сайт LP DAAC. Для Tls были загружены продукты MOD11B1 с пространственным разрешением ~ 4,8 км и MOD11_L2 с разрешением ~ 1км. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем эти оценки получают за временной период в 8 дней. Затем с помощью специально созданного программного обеспечения были выполнены форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов спутникового зондирования. Достоверность оценок T_{ls} (MOD11B1 и MOD11_L2) проверялась путем их сопоставления с данными квазисинхронных пространственно совмещенных наземных агрометеорологических наблюдений, а также с аналогичными оценками по данным AVHRR/3. Оценки T_{ls} (MOD11B1) для большинства сроков оказались более достоверны, чем оценки Tls (MOD11_L2). Разности оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR/3) лежали в диапазоне 2,0-4,0°С, а СКО оценок Tls (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышали 3,5°С.

Оценки ТПП T_{ls} и E в светлое и темное время суток для исследуемого региона были также получены с помощью разработанного оригинального метода тематической обработки данных измерений аппаратуры SEVIRI/Meteosat-8, -9 (Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010 а, б). Метод предполагает последовательное применение локального алгоритма “расщеплённого окна прозрачности” и метода “двух температур”, в нем используются “безоблачные” данные SEVIRI в ИК каналах № 9 (10,8 мкм) и № 10 (12 мкм) за три последовательных срока (например, за 11, 12, 13 ч. UTC или за 23, 24, 01 ч. UTC); при этом задания начальных приближений для E9 и E10 с хорошей точностью не требуется. Анализ достоверности оценок Tls, построенных в НИЦ “Планета”, проводился путём сопоставления с независимыми синхронными оценками T_{ls} , полученными по данным SEVIRI в LSA SAF (Прикладном центре анализа спутниковых данных о поверхности Земли, Лиссабон, Португалия). Величины усредненных за сутки и за месяц СКО оценок T_{ls} (НИЦ “Планета”)

от оценок T_{ls} (LSA SAF) находятся в диапазоне 0.8-1.6°C для различных дат и сроков сезона вегетации 2009 г., что для рассматриваемого диапазона зенитных углов (около 2.5°) можно считать косвенным подтверждением работоспособности предложенного метода.

Физико-математическая модель SVAT предназначена для расчета суммарного испарения (испарения с голой почвы и транспирации растительности), влагосодержания почвы, потоков скрытого и явного тепла и других составляющих водного и теплового балансов, распределений влажности и температуры почвы по глубине, а также температур поверхности почвы T_g и растительного покрова T_f и радиационной ТПП T_s для любых интервалов времени в течение сезона вегетации. Структура модели, основные уравнения, используемые для описания процессов вертикального тепло- и влагопереноса в системе “почва-растительность-атмосфера”, методы задания параметров и результаты проверок модели в целом и ее отдельных блоков освещены в наших публикациях (см., например, Музылев и др., 2002, 2005, 2010). Верификация модели производилась путем сравнения вычисленных и измеренных значений влагозапасов метрового слоя почвы и суммарного испарения, рассчитанных и фактических вертикальных профилей влажности и температуры почвы и значений температуры ее поверхности для выборочного числа агрометеостанций (из 48, расположенных на исследуемой территории). Также для ряда агрометеостанций, отдельных узлов вычислительной сетки и всей исследуемой территории проводилось сопоставление рассчитанных по модели значений температур T_f и T_s с их спутниковыми аналогами T_a и $T_{s,eff}$ для AVHRR и T_{ls} для MODIS и для SEVIRI.

Обсуждение результатов

Моделирование процессов тепло- и влагопереноса с использованием данных ДЗЗ для исследуемой территории проводилось следующим образом. Спутниковые оценки характеристик ТПП и все значения параметров и входных переменных модели (метеохарактеристик) были получены для узлов регулярной сетки размером 3x3 пиксела (7x5 км²), накладывавшейся на рассматриваемую территорию (размер пиксела для ИК каналов радиометра AVHRR составляет 1' по широте и 1.5' по долготе, разрешение для аналогичных каналов MODIS равно 1 и 4.8 км, а для таких же каналов SEVIRI – 0.05° по широте и 0.06° по долготе – при подобных разрешениях размеры ячеек были достаточно близки). Для узлов данных сеток по данным AVHRR производились оценки значений T_a , T_g , $T_{s,eff}$, NDVI, E, B и LAI, по данным MODIS – оценки T_{ls} и LAI, по данным SEVIRI – оценки T_{ls} , а с помощью модели рассчитывались значения температуры поверхности растительного покрова T_f , T_g и радиационной ТПП T_s . Сопоставление значений ТПП производилось для AVHRR и MODIS по датам и срокам спутниковых измерений при безоблачных условиях за каждый из сезонов вегетации 2003-2009 гг., а для SEVIRI – по трехчасовым интервалам для нескольких 5-7-дневных серий (также при безоблачной атмосфере) в разные месяцы сезона вегетации 2009 г. Для большинства сроков каждого из рассматривавшихся сезонов вегетации разности значений $T_{s,eff} - T_s$, $(T_{ls} - T_s)$, $T_a - T_f$ не превышали величин погрешностей определения $T_{s,eff}$ и T_a по данным AVHRR. На рис. 1 представлены примеры пространственного распределения разности температур $T_{s,eff}$ (AVHRR) – T_s (MODEL) для меньшей из исследуемых территорий на две даты сезона вегетации 2009 г. Из рисунка видно, что расхождения между $T_{s,eff}$ и T_s лежат в пределах ошибки оценки $T_{s,eff}$ по данным AVHRR почти на всей территории. Отдельные локальные пятна с разностью температур 20°C соответствуют облакам над данным участком территории. Это хорошо прослеживается на изображениях в видимом диапазоне. Аналогичные распределения были

построены и для разности $T_{ls}(\text{MODIS}) - T_s(\text{MODEL})$. Наибольшие расхождения модельных, спутниковых и наземных оценок за отдельные сроки отмечаются в жаркие летние дни, они могут быть обусловлены локальным перегревом поверхности (разности температур второй половины дня и утра достигают 40°C и больше), несовпадением моментов времени спутниковых и наземных измерений, а также естественной генерализацией спутниковых данных. Результаты сравнения температуры T_{ls} , определенной по данным непрерывных измерений SEVIRI за несколько 6-дневных интервалов сезона вегетации 2009 г., с данными срочных трехчасовых измерений температур воздуха T_a и поверхности почвы T_g на агрометеостанциях представлены на рис. 2а, а с температурой T_f , рассчитанной по модели по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений – на рис. 2б. Величины СКО для T_{ls} и T_a лежат в диапазоне $3.6\text{--}5.0^\circ\text{C}$, что близко к данным анализа статистики отклонений. Сравнение T_{ls} и T_f дает величины СКО в диапазоне $4.1\text{--}4.8^\circ\text{C}$, что вполне приемлемо для сопоставления таких разных характеристик.

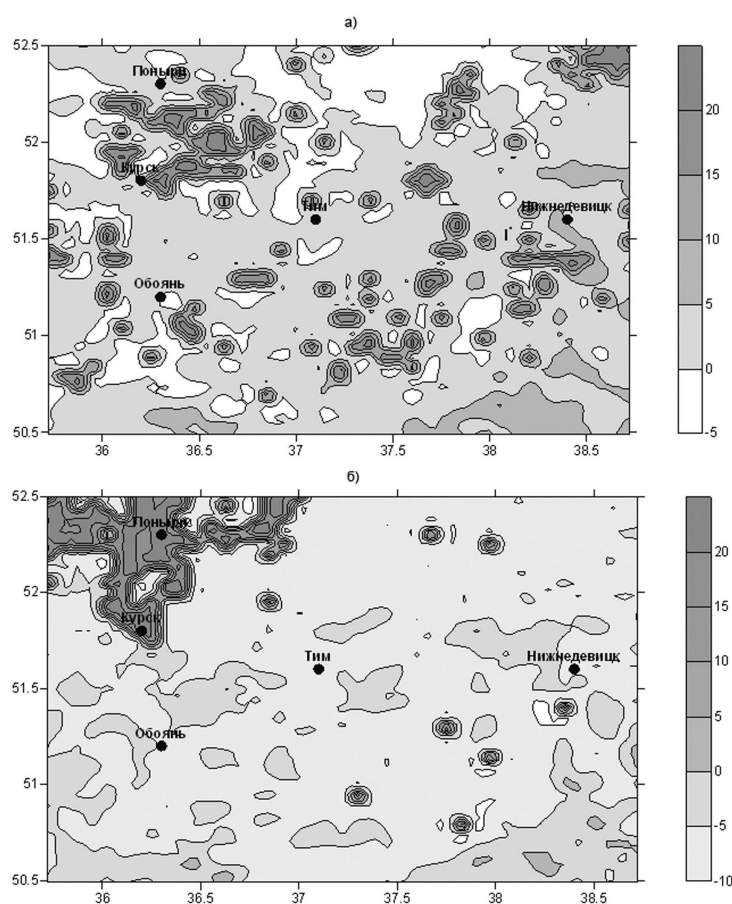


Рис.1. Распределение разности температур подстилающей поверхности $\Delta T = T_{s.\text{eff}}(\text{AVHRR}) - T_s(\text{MODEL})$ для участка территории Центрально-Черноземной зоны Европейской части России площадью 23500 км^2 с пространственным разрешением $\sim 5 \text{ км}$ на 14 ч. местного времени для 27 мая (а) и 12 августа (б) 2009 г.

Разработка способов ассимиляции в модели спутниковых оценок характеристик подстилающей поверхности и метеохарактеристик включала: 1) подтверждение возможностей замены используемых в качестве параметров модели величин LAI и В, определенных по данным наземных наблюдений, на их спутниковые оценки; 2) ввод в модель спутниковых оценок ТПП в качестве переменной при согласовании моментов времени спутниковых и наземных наблюдений; 3) разработку процедур учета в модели распределений по площади исследуемой территории спутниковых оценок LAI, В, ТПП и построенных по сетевым наземным данным

оценок интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха путем ввода их значений в каждом узле вычислительной сетки. Итоговым результатом разработки модели SVAT, адаптированной к спутниковым оценкам характеристик подстилающей поверхности и метеохарактеристик, являлось проведение расчетов составляющих водного и теплового балансов для каждой из исследуемых территорий при задании LAI, В и ТПП по спутниковым данным радиометров AVHRR, MODIS и SEVIRI для упомянутых сезонов вегетации.

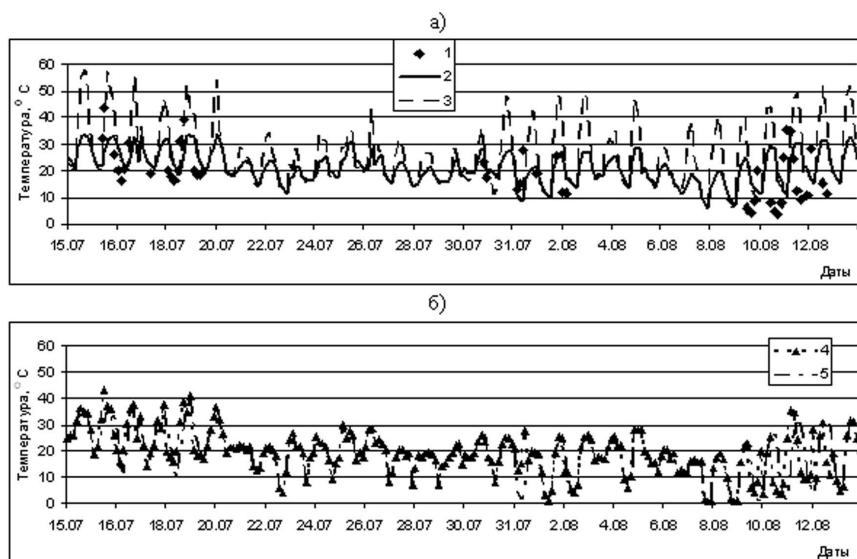


Рис.2. Температура подстилающей поверхности, определенная по данным SEVIRI/Meteosat-9 (1) и (4) и рассчитанная по модели по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений (5), температура воздуха (2) и поверхности почвы (3) на воднобалансовой станции Нижнедевицк за часть сезона вегетации 2009 г.

Возможность замены значений LAI и В, определенных по данным агрометеостанций, на их оценки по данным AVHRR и MODIS подтверждалась путем сравнения временных ходов LAI за период вегетации, построенных по данным наземных и спутниковых измерений. Для построения первого из них и нахождения максимальных значений LAI для разных сельскохозяйственных культур использовались экспериментальные зависимости LAI от высоты растений, определявшейся при стандартных фитометрических наблюдениях на агрометеостанциях (Бусарова, Шумова, 1987). Оценки LAI по данным AVHRR/3 производились с помощью эмпирических зависимостей $LAI = -2.5 \cdot \ln(1.2 - 2 \cdot NDVI)$ для сельскохозяйственных культур (Biftu, Gan, 2001) и $LAI = NDVI \cdot 1.71 + 0.48$ для травянистой растительности (Biospheric Aspects, 1993). Вегетационный индекс NDVI рассчитывался по значениям альбедо A1 и A2, полученным по измерениям AVHRR в 1-м и 2-м каналах, с помощью формулы $NDVI = (A2 - A1) / (A2 + A1)$. Оценки LAI по данным MODIS были загружены с веб-сайта LP DAAC (NASA) и подвергнуты описанной выше обработке. Проверка корректности оценок LAI выполнялась также косвенно – путем сопоставления модельных оценок T_f и T_s с их спутниковыми аналогами T_a и $T_{s,eff}$ (T_{ls}). Наибольшими оказались различия между LAI(AVHRR) для зерновых и LAI(MODIS), в то же время значения последних были достаточно близки к полученным по данным AVHRR и наземным данным значениям LAI для травяных культур. Различия могут быть обусловлены целым рядом факторов, среди них – несовершенство используемых эмпирических формул, разнообразие видового состава растительности вблизи рассматриваемой агрометеостанции, разные масштабы временно-го осреднения получаемых оценок (по интервалам в 8 суток у MODIS и мгновенных у AVHRR), разные алгоритмы расчетов LAI(AVHRR) и LAI(MODIS).

Оценки проективного покрытия B строились либо по данным AVHRR с использованием эмпирических зависимостей $B = (NDVI - NDVI_g)/(NDVI_v - NDVI_g)$, где $NDVI$, $NDVI_g$, $NDVI_v$ – вегетационный индекс для трех видов пикселей – рассматриваемого, без растительности и покрытого растительностью (Valor, Caselles, 1996), либо по данным наземных измерений или данным AVHRR или MODIS с помощью формулы

$B = 1 - \exp(-k \cdot LAI)$. Здесь k – эмпирический коэффициент, значения которого подбирались нами при разных вариантах построения временного хода LAI по спутниковым и наземным данным (При этом подборе также проводилось сравнение T_f и T_s с T_a и $T_{s,eff}$ (T_{ls})). В настоящей работе k принималось равным 0.40.

Сравнение модельных оценок температур T_f и T_s с их спутниковыми аналогами T_a и $T_{s,eff}$ (T_{ls}) для рассматривавшихся сезонов вегетации при оценках LAI и B по данным AVHRR/3, MODIS и по наземным данным производилось выборочно в пунктах нахождения нескольких агрометеостанций и в ряде узлов вычислительной сетки модели. Как и в работе (Музылев и др., 2010), наименьшими оказались расхождения спутниковых и модельных оценок T_a и T_p , практически для всех случаев сравнения за рассматривавшиеся сезоны не превышавшие значений погрешности определения T_a по данным AVHRR. Подобные результаты получены и для разностей значений $T_{s,eff} - T_s$ ($T_{ls} - T_s$) при оценках LAI и B по наземным данным за исключением периодов покосов на травянистых участках и дней, в которые отмечались местные перегревы поверхности почвы. При оценках LAI и B по данным AVHRR разности $T_{s,eff} - T_s$ превышали значения погрешностей спутниковых оценок $T_{s,eff}$ в большем числе случаев, что может быть обусловлено разной степенью генерализации спутниковых и наземных данных и несовпадением моментов времени их получения. Аналогичное сравнение T_{ls} (MODIS) с $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_s показало, что наименьшие расхождения получаются между оценками $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_{ls} (MODIS) – для большинства сроков измерений эти расхождения не превышали величины погрешности определения $T_{s,eff}$ по данным AVHRR/3. Расхождения между T_{ls} (MODIS) и T_s также оказались в допустимых пределах.

Одним из этапов разработки способов ассимиляции в модели SVAT спутниковых данных являлось исследование возможности использования в качестве входной переменной модели оценок ТПП, полученных по информации AVHRR/3, MODIS и SEVIRI. Адекватность результатов моделирования при таком подходе обеспечивается синхронностью наземных и спутниковых измерений ТПП, поскольку использование разновременных наземных и спутниковых данных из-за внутрисуточного хода температуры может приводить к существенным расхождениям оценок составляющих водного и теплового балансов. Этот вывод подтвержден результатами модельных экспериментов, проводившихся в настоящей работе для рассматривавшихся сезонов вегетации при использовании различных по времени дня данных AVHRR/3 и MODIS и срочных наземных наблюдений. При совпадении или близости моментов времени этих наблюдений расхождения оценок температур по данным AVHRR/3 и MODIS с результатами расчетов по модели не превышали погрешности определения температур по данным AVHRR/3, а различия вычисленных значений суммарного испарения и влагозапасов почвы с измеренными на агрометеостанциях находились в пределах стандартной ошибки оценки этих величин. Представленные особенности использования спутниковых оценок ТПП характерны для данных AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и Aqua, регистрируемых максимум дважды в день (при отсутствии облачности). Использование оценок ТПП по данным SEVIRI/Meteosat-9, получаемым четырежды в час с последующим осреднением по трехчасовым интервалам, снимает описанные затруднения, позволяя производить расчеты по модели с требуемым временным шагом. Для их проведения необходимо формировать ряд

непрерывных внутрисуточных измерений ТПП максимальной продолжительности. Результаты сравнения ТПП, определенной по данным SEVIRI за несколько 6-дневных интервалов сезона вегетации 2009 г., с аналогичной температурой, рассчитанной по модели по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений, приведены на рис. 2б. Представленные результаты подтверждают возможность введения в модель спутниковых оценок ТПП в качестве переменной для расчетов с приемлемой точностью составляющих водного и теплового балансов.

Разработанные способы усвоения в модели SVAT данных дистанционного зондирования включают процедуры учета в модели распределений по площади рассматриваемого участка суши спутниковых оценок характеристик ПП и метеохарактеристик. Основу этих процедур составляют алгоритмы ввода в модель в узлах ее вычислительной сетки оценок LAI и В, построенных по спутниковой информации AVHRR и MODIS, и значений ТПП, полученных по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI. Пример подготовленного для ввода в модель распределения LAI, построенного по данным AVHRR/3 для территории площадью 227300 км² за один из сроков сезона вегетации 2009 г., представлен на рис. 3. Аналогичные распределения В и ТПП на разные даты также построены. При отсутствии в конкретные сроки спутниковой информации о температуре поверхности в каких-нибудь узлах сетки или для всей территории значения этой величины рассчитывались с помощью модели по данным измерений на агрометеостанциях при использовании интерполяционных процедур. Эффективность представленного подхода сильно зависит от наличия внутри каждых суток последовательных по времени спутниковых измерений названных характеристик, позволяющих сформировать непрерывный ряд значений входных переменных и параметров модели.

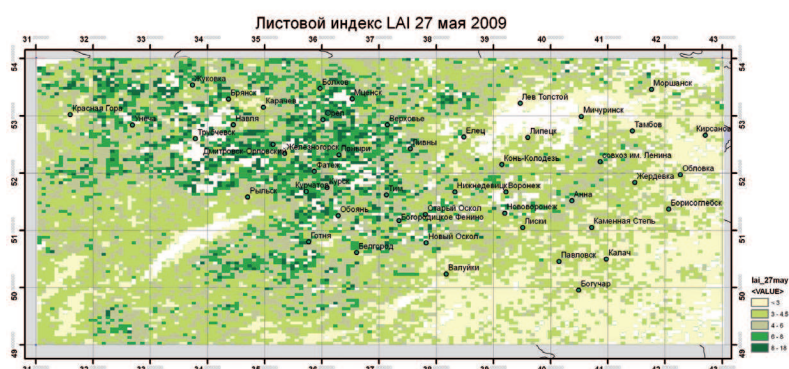


Рис.3. Распределение листового индекса LAI по территории Центрально-Черноземных областей Европейской части России площадью 227300 км², построенное по данным AVHRR на 12 ч. местного времени 27 мая 2009 г.

С помощью модели SVAT в разработанной версии, включавшей описанные процедуры ассимиляции спутниковых данных, были рассчитаны составляющие водного и теплового балансов – суммарное испарение E_v , влагосодержание почвы W , инфильтрация воды в почву, поток влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие слои, потоки скрытого LE и явного H тепла, теплосодержание почвы для трех участков исследуемого региона. Проверка точности оценок E_v и W осуществлялась при сравнении их рассчитанных и фактических значений. При отсутствии данных измерений E_v проводилось сопоставление его значений, рассчитанных для всех возможных вариантов оценки LAI, В и ТПП по информации с разных спутников. При всех этих расчетах погрешность оценки E_v не превышала стандартной ошибки его оценки (~ 20-25 %) как для трехчасовых интервалов, так для суток и пентад. Существующие расхождения могут быть вызваны разбросом значений радиационных характеристик, погрешностью оценок LAI, локальным выпа-

дением осадков большой интенсивности и, как следствие, резким изменением водного режима конкретного участка территории, неточностью используемых оценок ТПП, локальными перегревами подстилающей поверхности в послеполуденные часы, которые могут не фиксироваться моделью. К сожалению, в пределах исследуемой территории существуют лишь единичные станции, на которых проводятся измерения испарения, и их данные никак не могут быть распространены на все рассматриваемые площади. Пример временного хода величин E_v за сезон вегетации 2009 г., рассчитанных при оценках LAI по данным AVHRR и MODIS и измеренных на одной из водобалансовых станций региона, приведен на рис. 4. На рис. 5 представлен временной ход величин E_v , рассчитанных по модели использованием оценок ТПП по данным SEVIRI и по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений за несколько 6-дневных интервалов сезона вегетации 2009 г.

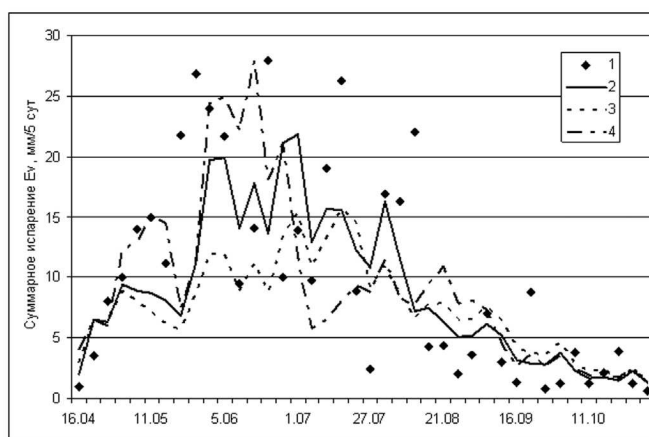


Рис.4. Значения суммарного испарения E_v для сезона вегетации 2009 г.: измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и многолетних трав (3) и при оценках LAI по данным MODIS (4)

Следует отметить близость полученных результатов, которая могла быть обусловлена высокой точностью оценок ТПП(SEVIRI), в том числе и за счет большой частоты измерений. Временной ход влагозапасов почвы W , рассчитанных для нескольких вариантов оценки LAI и W по данным AVHRR и MODIS, оказался весьма близок временному ходу их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис.6). Использование оценок ТПП по данным SEVIRI при расчетах величин W дало аналогичные результаты.

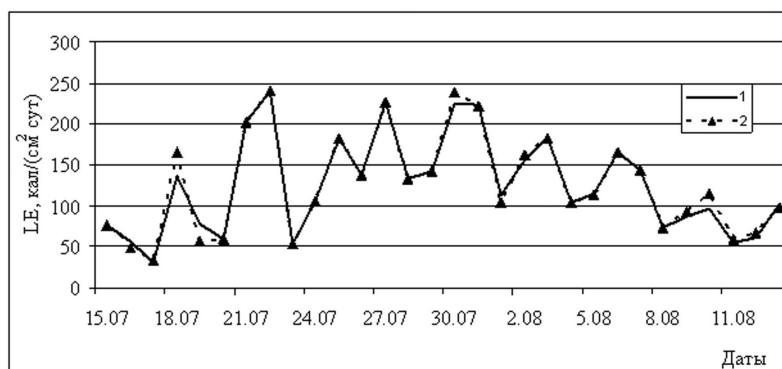


Рис.5. Рассчитанные по модели по трехчасовым интервалам величины потока скрытого тепла за период с 15.07 по 13.08 2009 г. для воднобалансовой станции Нижнедевицк при использовании оценок температур подстилающей поверхности, полученных по данным SEVIRI/Meteosat-9 (1) и срочным трехчасовым данным наземных наблюдений (2)

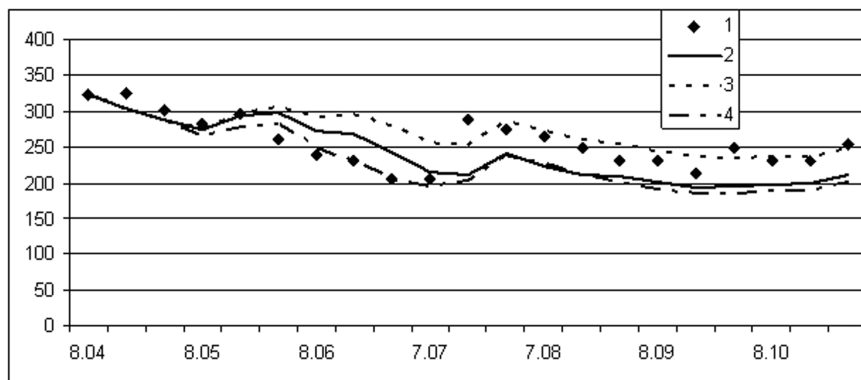


Рис.6. Временной ход влагозапасов почвы (в мм слоя), измеренных на агрометеостанции Нижнедевицк под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/3 для зерновых (2) и травяных (3) культур и по данным MODIS (4) для сезона вегетации 2009 г.

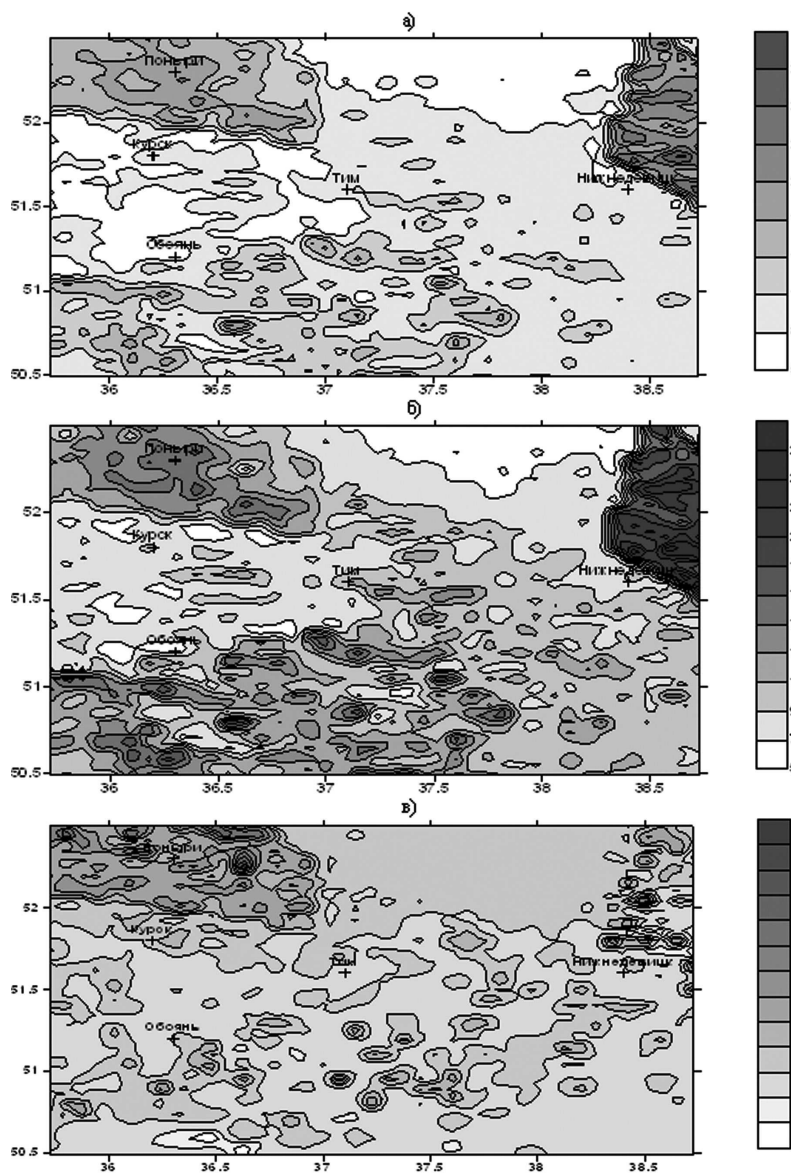


Рис.7. Поток скрытого тепла (кал/(см²·сут)), рассчитанный по модели с использованием оценок температуры подстилающей поверхности по наземным данным (а) и данным AVHRR (б) и разность этих потоков (в) для участка территории Центрально-Черноземной зоны площадью 23500 км², расположенного в Курской, Белгородской и Воронежской областях, на 14 ч. местного времени 27 мая 2009 г.

Все рассчитывавшиеся по модели величины – E_v , W , LE , H и другие составляющие водного и теплового балансов, а также ТПП были получены в виде их распределений по площади каждой из исследуемых территорий. Для задания метеорологических характеристик в узлах пространственной сетки использовалась процедура весовой интерполяции данных измерений на метеостанциях исследуемого региона. В качестве примера на рис.7а, б для территории площадью 23500 км² приведены результаты расчетов потока скрытого тепла LE с использованием оценок ТПП по наземным данным и данным AVHRR, а на рис.7в для той же территории – разности этих оценок. Как видно из рисунков, расхождения величин LE , полученных при использовании разных исходных данных, находятся в пределах стандартной ошибки их оценки. Аналогичные результаты получены и для распределений величин LE , H и W , рассчитанных с использованием полей оценок LAI, B и ТПП по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI, для территории площадью 227300 км².

Заключение

Таким образом, в результате настоящей работы:

1. Разработан и испытан метод тематической обработки данных измерений аппаратуры SEVIRI геостационарных ИСЗ “Meteosat-8, -9” для дистанционного определения температуры подстилающей поверхности (ТПП) и излучательной способности почвы в светлое и темное время суток.

2. Усовершенствована технология получения оценок характеристик растительности и ТПП по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua.

3. Разработана модель вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера» (SVAT), рассчитанная на использование спутниковой информации о состоянии ПП и учитывающая неоднородность почвенного и растительного покровов и метеоусловий. В рамках работ по ее созданию разработаны способы ассимиляции в модели полученных по спутниковым данным оценок листового индекса LAI, проективного покрытия B и ТПП, а также процедуры учета в модели пространственной изменчивости названных величин и метеохарактеристик, определяемых по спутниковым и наземным данным. Результаты моделирования представлены в виде полей значений составляющих водного и теплового балансов для обширных покрытых растительностью территорий.

Авторы выражают благодарность Е.В. Волковой, А.В. Кухарскому и С.А. Успенскому за создание программного обеспечения и проведение тематической обработки спутниковых данных.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант № 10-05-00807.

Литература

1. Бусарова О.Е., Шумова Н.А. Биометрические характеристики посевов некоторых сельскохозяйственных культур и их использование для расчетов испарения // Водные ресурсы. 1987. № 2. С.130-135.

2. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В.* Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием синхронной спутниковой информации высокого разрешения // *Метеорология и гидрология*, 2002. № 5. С.68-82.
3. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П.* Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // *Исследование Земли из космоса*, 2005. № 4. С.35-44.
4. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Моделирование составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности // *Метеорология и гидрология*, 2010. № 3. С.118-133.
5. *Соловьев В.И., Успенский С.А.* Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // *Исследование Земли из космоса*. № 3. 2009. С.79-89.
6. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.* Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // *Метеорология и гидрология*. 2010 а. № 3. С.5-17.
7. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.* Развитие методов мониторинга температуры поверхности суши по данным геостационарных спутников нового поколения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010 б. Т.7. № 2. С.67-74.
8. *Biftu G.F., Gan T.Y.* Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River basin, Alberta, using remotely sensed data // *Journal of Hydrology*, 2001. V.244. P.137-156.
9. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS). Report № 27.* Ed. by BAHС Core Project Office // *Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Germany*. 1993. 103 p.
10. *Valor E., Caselles V.* Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas // *Remote Sensing of Environment*, 1996. V.57. P.167-184.

Modeling water and heat balance components for part of the Central Black Earth zone of European Russia utilizing satellite data on land surface characteristics

E.L. Muzylev¹, A.B. Uspensky², Z.P. Startseva¹

¹*Water Problem Institute of Russian Academy of Sciences
Russia, 119333 Moscow, Gubkin str., 3*

²*State Research Center of Space Hydrometeorology Planeta
Russia, 123242 Moscow, B. Predtechensky, 7.*

Results are presented of modeling water and heat balance components utilizing satellite-based fields of land surface temperatures and vegetation parameters for three embedded one into another areas of the Central Black Earth zone of European Russia with square 23500, 52800 and 227300 km² for vegetation seasons 2003-2009. Satellite-based estimates of land surface characteristics have been derived from AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra and Aqua, and SEVIRI/Meteosat-9 data using refined technologies. The techniques are represented for assimilation of these remote sensing products in the model of vertical water and heat transfer in the “soil-vegetation-atmosphere” system (SVAT) intended for calculating vertical water and heat fluxes, soil water and heat content, land surface and soil temperatures.

Keywords: water and heat balance components, model of water and heat transfer, satellite data thematic processing, spatial variability of land surface characteristics.