

Моделирование вертикальных потоков влаги и тепла с поверхности речного водосбора с использованием оценок характеристик подстилающей поверхности по спутниковым данным

Е.Л. Музылев¹, А.Б. Успенский², З.П. Старцева¹, Е.В. Волкова², А.В. Кухарский²

¹ Институт водных проблем РАН

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

² ГУ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"

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

Разработана модель вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), предназначенная для расчета составляющих водного и теплового балансов, а также распределений температуры и влажности почвы по глубине и температуре ее поверхности и поверхности растительного покрова. Модель рассчитана на использование оценок характеристик растительности и температуры подстилающей поверхности (ТПП), построенных по данным измерений радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA) и MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua). Расчеты производились для части Курского региона площадью около 10000 км² за сезоны вегетации 2005-2008 гг.

Для эффективного усвоения в модели SVAT спутниковых данных исследованы возможности замены полученных по данным декадных и срочных наземных сетевых измерений оценок листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью В и ТПП, используемых в качестве параметров и входной переменной модели, на их оценки по данным AVHRR и MODIS. Также предложен способ учета в модели пространственной неоднородности полей LAI, В и ТПП, построенных по упомянутым спутниковым данным. Для названных сезонов вегетации проведены расчеты по модели величин составляющих водного и теплового балансов, а также температур поверхностей почвы и растительного покрова для исследуемого региона при различных вариантах оценки LAI, В и ТПП по спутниковым и наземным данным. Погрешности расчетов названных величин при всех вариантах задания параметров и входных переменных оказались в стандартных пределах.

Введение

В настоящее время методы моделирования процессов влаго- и теплообмена в системе "почва-растительность-атмосфера" совершенствуются как правило путем уточнения влияния неоднородности подстилающей поверхности (ПП) на ход этих процессов, а также нахождения их адекватных параметризаций для различных пространственных масштабов. Повышение точности оценок характеристик влаго- и теплопереноса на региональном уровне существенно зависит от возможности улучшения информационного обеспечения моделей, предполагающего получение и накопление данных измерений для задания параметров моделей, значений входных переменных, а также граничных и начальных условий. Привлечение спутниковых данных дистанционного зондирования Земли о характеристиках ПП с требуемым пространственным разрешением в дополнение к данным наземных измерений позволяет производить учет пространственной изменчивости этих характеристик в моделях типа SVAT при расчетах составляющих водного и теплового балансов для различных по размерам территорий, в том числе территорий с редкой сетью наземных наблюдений.

В рамках данной идеологии в настоящей работе: 1) по данным измерений радиометра AVHRR/NOAA получены оценки температуры поверхности почвы T_{sg} и ее излучающей способности E , температуры поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры $T_{s,eff}$, нормализованного индекса вегетации NDVI, проективного покрытия растительностью В и листового индекса LAI, а по данным радиометра

MODIS/EOS Terra и Aqua – оценки T_{sg} , E, NDVI, LAI; 2) разработана модель SVAT, рассчитанная на использование спутниковых оценок названных характеристик при учете их пространственной изменчивости; 3) с помощью модели выполнены расчеты составляющих водного и теплового балансов для части Курского региона, включающей водосбор р.Сейм площадью 7460 км², для сезонов вегетации 2005-2008 гг.

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

Физико-математическая модель SVAT, предыдущие версии которой представлены в работах [1-3], предназначена для описания процессов тепло- и влагообмена на покрытых растительностью участках суши в течение вегетационного периода. С помощью этой модели можно рассчитывать испарение с поверхности почвы, транспирацию растительности, влагосодержание почвы, вертикальные потоки скрытого и явного тепла, распределения влажности и температуры почвы по глубине, а также температуры поверхности почвы T_g и растительного покрова T_f и радиационную температуру подстилающей поверхности (ТПП) T_s . ПП рассматривается в модели как совокупность двух слоев – почвы и растительности, для каждого из которых производится отдельный учет приходящих и исходящих потоков тепла и влаги. Это относится как к суммарному испарению, представляющему в виде суммы двух потоков – испарения с голой почвы E_g и транспирации растительности E_f : $E_g = \rho_a \cdot (r \cdot q^*(T_g) - q_{af}) / r_{ag}$, $E_f = \rho_a \cdot (q^*(T_f) - q_{af}) \cdot LAI / (r_a + r_s)$, так и к потокам скрытого LE_g и явного H_g и H_f тепла: $H_g = \rho_a \cdot c_p \cdot (T_g - T_{af}) / r_{ag}$, $H_f = \rho_a \cdot c_p \cdot (T_f - T_{af}) / r_{af}$. Здесь $q^*(T_g)$ и $q^*(T_f)$ – удельные влажности насыщения при температурах T_g и T_f ; T_{af} и q_{af} – средняя температура и удельная влажность воздуха в межлистном пространстве; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; r – относительная влажность воздуха на поверхности почвы; r_{ag} и r_{af} – аэродинамические сопротивления между поверхностью земли и поверхностью листьев и поверхностью листьев и атмосферой; r_s – устьичное сопротивление растительности, LAI – листовой индекс; ρ_a – плотность воздуха, L – удельная теплота парообразования.

Вертикальный перенос воды в почве описывается уравнением диффузии влаги с учетом ее поглощения корнями растений. Верхнее граничное условие задается в виде поступающего на поверхность почвы потока влаги, определяемого из уравнения водного баланса для этой поверхности. Нижнее граничное условие представляется как поток влаги из верхнего метрового слоя почвы в нижележащие горизонты, принимаемый равным гидравлической проводимости. Температурный режим рассматриваемого метрового слоя почвы описывается с помощью уравнения теплопроводности с верхним граничным условием в виде потока приходящего к почве тепла. Этот поток является одним из слагаемых в уравнении теплового баланса для верхнего слоя голой почвы. Из последнего уравнения определяются значения T_g . Нижнее граничное условие задается в виде пропорционального градиенту температур потока тепла, уходящего от метрового слоя почвы к нижележащим слоям. Значения T_f находятся из уравнения теплового баланса для растительного покрова в пренебрежении его теплосодержанием. Набор входных переменных модели составляют суммарная радиация, осадки, облачность, скорость ветра, температура, влажность и давление воздуха, значения которых определяются по данным стандартных срочных (трехчасовых) сетевых метеорологических наблюдений. Начальные условия для уравнений влаги

гопереноса и теплопроводности задаются в виде вертикальных профилей влажности и температуры почвы, измеренных на агрометеостанциях региона на момент начала вегетации. Данная начально-краевая задача решалась численно с трехчасовым шагом по времени. Детали описания модели SVAT можно найти в [2-4].

Учет различных типов почв и видов растительности производился путем ввода в модель распределений значений ее параметров по площади исследуемого участка. Тип почвы характеризовался объемным весом, пористостью, максимальной гигроскопичностью, наименьшей полевой влагоемкостью, коэффициентом фильтрации. Неоднородность растительного покрова представлялась устьичным сопротивлением, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений, и листовым индексом LAI. Спутниковые оценки характеристик ПП и все значения параметров и входных переменных модели (метеохарактеристик) были получены для узлов регулярной сетки размером 3x3 пикселя ($\sim 7 \times 5 \text{ км}^2$), накладывавшейся на рассматриваемую территорию (размер пикселя для ИК каналов радиометра AVHRR составляет 1' по широте и 1.5' по долготе). При этом в первоначальных версиях модели вся территория была разделена на участки, содержащие по одной агрометеостанции, данные метеорологических наблюдений на которой распространялись на этот участок. Каждому участку также соответствовал превалировавший на нем тип почв. В настоящей версии модели значения метеорологических характеристик в каждой ячейке сетки задавались по результатам интерполяции данных сетевых наземных наблюдений. В узлах сетки по данным AVHRR производились оценки значений T_a , T_{sg} , $T_{s.eff}$, NDVI, E, B и LAI, по данным MODIS – оценки $T_{s.eff}$, E, NDVI, LAI, а с помощью модели – расчеты значений E_g , E_f , H_g , H_f и других составляющих водного и теплового балансов, а также значений T_f , T_g и радиационной ТПП T_s . Последняя величина получена из уравнения для длинноволновой части радиационного баланса $\sigma T_s^4 = R_a - R_{lf} - R_{lg}$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, R_a – противоизлучение атмосферы; R_{lf} и R_{lg} – длинноволновые составляющие радиационного баланса для растительного покрова и оголенной почвы.

Методы и алгоритмы тематической обработки и анализа спутниковых данных (AVHRR/NOAA, MODIS/Aqua и Terra) для получения оценок характеристик ПП достаточно детально описаны в [2-4]. Выполненные к настоящему времени усовершенствования и модификации имели целью повышение достоверности спутниковых оценок и относятся к процедурам детектирования облачности и осадков [5], а также построения регрессионных оценок T_a и T_{sg} . В процедурах детектирования облачности и осадков, основанных на пороговых правилах, изменен состав предикторов, уточнены отдельные пороги [5]; кроме того, процедура адаптирована к измерениям AVHRR в темное время суток. При построении оценок T_a пополнена обучающая выборка синхронных и пространственно совмещенных спутниковых и наземных измерений. Оценки T_{sg} строились при различных способах задания излучательных способностей в спектральных диапазонах каналов 10.5-11.5 и 11.5-12.5 мкм, однако заметного повышения точности оценивания T_{sg} по сравнению с [4] достичь не удалось.

Обсуждение результатов

Для построения полей значений T_a , T_{sg} , $T_{s.eff}$, NDVI, E, B и LAI на исследуемой территории за сезоны вегетации 2005-2008 гг. с помощью усовершенствованной технологии тематической обработки результатов измерений радиометра AVHRR/NOAA был подго-

тovлен архив данных дистанционного зондирования и квазисинхронных наземных наблюдений для части Курского региона за названные сезоны вегетации. Архив содержит результаты измерений радиометра AVHRR/3 ИСЗ NOAA-18 в шести каналах и данные наблюдений за температурой воздуха и поверхности почвы на агрометеостанциях, находящихся на исследуемой территории. Оценки T_a , T_{sg} , $T_{s.eff}$, NDVI, E, B и LAI производились для фрагментов изображений размером 3x3 пикселя, соответствовавших ячейке сетки модели. Погрешность определения T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$ по данным AVHRR оценивалась путем их сравнения с данными ближайших по времени срочных наблюдений на агрометеостанциях. Среднеквадратическое отклонение (СКО) спутниковых оценок температур от результатов наземных измерений составило в среднем для T_a – 2.0-2.6, для $T_{s.eff}$ – 2.5-3.7, для T_{sg} – 3.5-4.9°C. Сравнение $T_{s.eff}$ с ближайшими по времени и местоположению оценками этой температуры, полученными для названных сезонов вегетации по данным радиометра MODIS, показало, что максимальные абсолютные разности значений $T_{s.eff}$ (MODIS) и $T_{s.eff}$ (AVHRR/3) лежат в диапазоне 2.0-3.0°C, а СКО оценок $T_{s.eff}$ (MODIS) от результатов наземных измерений температур как правило не превышают 3.5°C. Большие расхождения для отдельных сроков могут быть обусловлены локальным перегревом поверхности в летние дневные часы (до +60°C и выше), а также несовпадением моментов времени спутниковых и наземных измерений.

Разработка способов усвоения в модели SVAT спутниковых оценок характеристик ПП и метеохарактеристик включала: 1) исследование возможности замены используемых в качестве параметров модели величин LAI и B, 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 способа учета в модели пространственных распределений спутниковых оценок LAI, B, ТПП путем ввода их значений в каждом узле вычислительной сетки модели; 4) использование процедуры весовой интерполяции сетевых наблюдений для получения распределений по поверхности рассматриваемой территории интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха; 5) расчеты составляющих водного и теплового балансов для всей рассматриваемой территории при задании LAI, B и ТПП по спутниковым данным радиометров AVHRR и MODIS для сезонов вегетации 2005-2008 гг.

Исследование возможностей замены значений LAI и B, определенных по данным агрометеостанций, на их оценки по данным AVHRR [3] и MODIS [4] показало приемлемость таких замен при расчетах составляющих водного и теплового балансов. Это исследование продолжено в настоящей работе. Для построения временного хода LAI за период вегетации и нахождения его максимальных значений для разных сельскохозяйственных культур по наземным данным использовались экспериментальные зависимости LAI от высоты растений, определявшейся при фитометрических наблюдениях на агрометеостанциях. Оценки LAI по данным AVHRR/3 производились с помощью эмпирических зависимостей: $LAI = -2.5 \cdot \ln(1.2 - 2 \cdot NDVI)$ для сельскохозяйственных культур и $LAI = NDVI \cdot 1.71 + 0.48$ для травянистой растительности (ссылки см. в [3, 4]). Здесь вегетационный индекс $NDVI = (A_2 - A_1)/(A_2 + A_1)$, A_1 и A_2 – значения альбедо, полученные по измерениям AVHRR в 1-м и 2-м каналах. Оценки LAI по данным MODIS загружались с веб-сайта LP DAAC (NASA). Корректность оценок LAI проверялась путем сравнения его сезонных ходов, построенных по данным AVHRR/3 (для зерновых и травяных культур), MODIS и по наземным данным для всех названных сезонов вегетации, а также косвенно – путем срав-

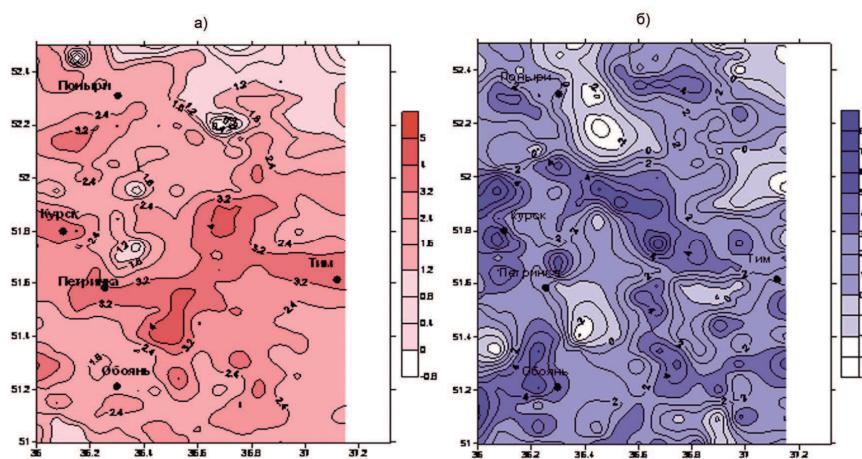
нения модельных оценок T_f , T_g и T_s с их спутниковыми аналогами T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$. Значения LAI (MODIS), будучи достаточно близкими к значениям LAI (AVHRR) для травянистых участков, а также к оценкам LAI для травяных культур по наземным данным, заметно отличаются от значений LAI (AVHRR) для зерновых. Такие отличия могут быть обусловлены несовершенством используемых эмпирических формул, особенностями видового состава растительности вблизи конкретной станции в данном сезоне, различием временных масштабов полученных оценок (осредненных за 8 суток для MODIS и мгновенных – с интервалом в три часа – для AVHRR), а также использованием для построения оценок LAI (AVHRR) и LAI (MODIS) разных алгоритмов.

Оценки проектного покрытия В по данным AVHRR строились либо с использованием эмпирических зависимостей $B = (NDVI - NDVI_g)/(NDVI_v - NDVI_g)$, где $NDVI$, $NDVI_g$, $NDVI_v$ – индексы вегетации для трех видов пикселов – рассматриваемого, без растительности и покрытого растительностью, соответственно, либо с помощью формулы $B = 1 - \exp(-k \cdot LAI)$. Здесь k – эмпирический коэффициент, значения которого подбирались нами в [3, 4] при разных вариантах построения временного хода LAI по спутниковым и наземным данным и результатам упоминавшегося сравнения T_f , T_g и T_s с T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$. При проводившихся в работе расчетах для k принималось значение 0.40.

Сравнение модельных оценок температур T_f , T_g и T_s с их спутниковыми аналогами T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$ для рассматривавшихся сезонов вегетации производилось в пунктах нахождения агрометеостанций региона и в узлах вычислительной сетки модели при оценках LAI и В по данным AVHRR/3, MODIS и по наземным данным. Как и в [4], наименьшими оказались расхождения спутниковых и модельных оценок T_a и T_f , практически для всех сроков измерений за все четыре сезона вегетации не превышавшие значений погрешности определения T_a по данным AVHRR. Подобные результаты получены и для разностей значений $T_{s.eff} - T_s$ и $T_{sg} - T_g$ при оценках LAI и В по наземным данным за исключением периодов покосов на травянистых участках и дней, в которые отмечались местные перегревы поверхности почвы. При оценках LAI и В по данным AVHRR разности $T_{s.eff} - T_s$, $T_{sg} - T_g$ превышали значения погрешностей спутниковых оценок $T_{s.eff}$ и T_{sg} в большем числе случаев, что может быть обусловлено разной степенью генерализации спутниковых и наземных данных и несовпадением моментов времени их получения. Аналогичное сравнение $T_{s.eff}(\text{MODIS})$ с $T_{s.eff}(\text{AVHRR})$ и T_s показало, что наименьшие расхождения получаются между оценками $T_{s.eff}(\text{MODIS})$ и результатами моделирования, а также между оценками $T_{s.eff}$ по данным AVHRR/3 и MODIS – для большинства сроков измерений эти расхождения не превышали величины погрешности определения $T_{s.eff}$ по данным AVHRR/3. В качестве примера на рис.1(а, б) представлены распределения разностей ТПП $T_{s.eff}(\text{AVHRR}) - T_s$ и $T_{s.eff}(\text{MODIS}) - T_s$ для исследуемой территории на одну из дат сезона вегетации 2008 г. В этом сезоне наибольшие расхождения приходились на середину июля – первую декаду августа, что соответствовало времени массовой уборки зерновых, покосам и связанным с этим резкому изменению состояния подстилающей поверхности.

Исследование возможности ввода в модель в качестве переменной значений ТПП, определенных по данным AVHRR/3 и MODIS [4], показало, что основным условием эффективности такого подхода является синхронность наземных и спутниковых измерений, поскольку использование разновременных наземных и спутниковых данных из-за внутрисуточного хода температуры может приводить к существенным расхождениям результатов расчетов составляющих водного и теплового балансов. Подобный вывод подтвержден

результатами модельных экспериментов, проводившихся в настоящей работе для сезонов вегетации 2005-2008 гг. 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. Надежность результатов подобных расчетов будет повышаться при увеличении длины последовательного ряда дней с большим числом внутрисуточных спутниковых измерений температуры.



*Рис. 1. Распределение разностей температур подстилающей поверхности
 $\Delta T_1 = T_{s,\text{eff}}(\text{AVHRR}) - T_s$ (а), $\Delta T_2 = T_{s,\text{eff}}(\text{MODIS}) - T_s$ (б) для части территории Курского региона,
включающей водосбор р. Сейм, с пространственным разрешением
~ 5 км. 6 июня 2008 г., 14 ч. местного времени*

Составной частью исследования возможностей использования в модели спутниковых оценок характеристик ПП и метеохарактеристик является разработка способов учета в модели распределения их значений по площади рассматриваемого участка суши. В настоящей работе разработана процедура введения в модель в узлах ее вычислительной сетки полученных по данным AVHRR и MODIS значений LAI, В и ТПП. Пример подготовленных для ввода в модель распределений LAI, построенных по данным AVHRR/3 для рассматриваемой территории, за два срока сезона вегетации 2008 г. приведен на рис.2. Аналогичные распределения построены для В и ТПП. Для тех сроков, по которым спутниковая информация в конкретных узлах сетки или для всей территории отсутствовала, в модель вводились значения рассматриваемых характеристик, полученные по данным измерений на агрометеостанциях при использовании интерполяционных процедур. Эффективность представленного подхода сильно зависит от наличия внутри каждого суток последовательных по времени спутниковых измерений названных характеристик, позволяющих построить непрерывный ряд значений входных переменных и параметров модели. Для построения относительно реалистичной картины полей метеорологических характеристик на пространственных масштабах, меньших характерных расстояний между метеорологическими станциями, использовалась процедура весовой интерполяции. Входные метеорологические величины рассчитывались в каждой ячейке сетки модели путем интерполяции данных измерений на метеорологических станциях по формуле:

$z_j = \left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} Z_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} \right)$, где z_j - значение метеорологической переменной (температуры воздуха, осадков и других) в j -й ячейке сетки; Z_i - измеренное значение соответствующей переменной на i -й метеорологической станции ($i = 1, 2, \dots, n$); $\omega_{ij} = 1/d_{ij}^2$; d_{ij} - расстояние от j -й ячейки до i -й станции. При реализации данной процедуры интерполяции сетевых наблюдений были получены распределения по площади исследуемой территории интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха и таким образом обеспечен ввод в модель ее входных переменных - метеорологических характеристик.

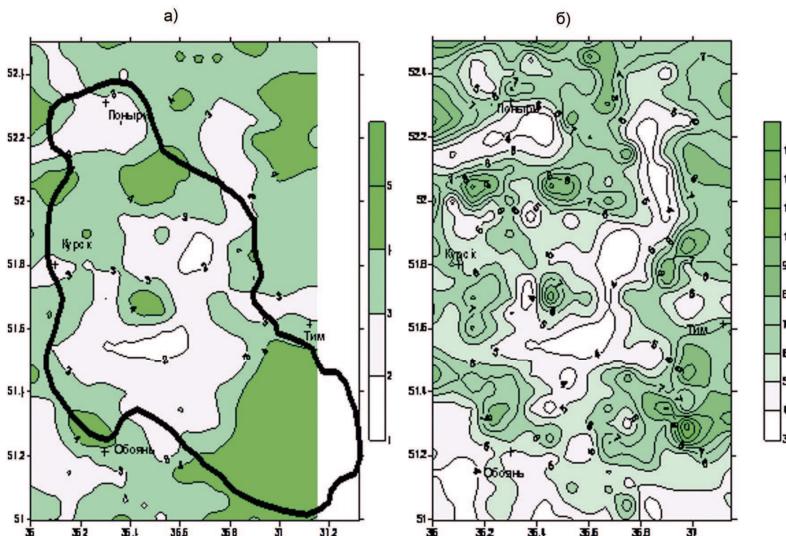


Рис. 2. Распределения листового индекса LAI, построенные по данным AVHRR/3 для территории, включающей водосбор р. Сейм, на 14 ч. местного времени 6 июня (а) и 17 августа (б) 2008 г.

С помощью модели SVAT при использовании пространственных распределений LAI и В, полученных по данным AVHRR/3 и MODIS, рассчитывались 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 Н тепла, теплосодержание почвы. Расчеты проводились для части Курского региона, включающей водосбор р. Сейм, для сезонов вегетации 2005-2008 гг. Точность оценок E_v и W проверялась путем сравнения вычисленных и измеренных значений этих величин, а в отсутствие измерений E_v – по результатам сопоставления его значений, рассчитанных для всех возможных вариантов оценки LAI и В. При всех этих расчетах различия значений E_v не превышали нескольких мм за пентаду (рис.3). Такая погрешность лежит в пределах стандартной ошибки оценки испарения (~ 20-25 %). Отдельные выбросы могут получаться за счет резкого увеличения транспирации после локальных выпадений осадков большой интенсивности, местных перегревов подстилающей поверхности в послеполуденные часы, которые не всегда фиксируются моделью, погрешностями оценок LAI. Однако поскольку количество случаев наблюдений за испарением в течение сезона вегетации для всего региона измеряется единицами и их данные трудно считать репрезентативными, к результатам сравнения рассчитанных и измеренных значений E_v следует относиться с осторожностью. При этом различия результатов расчета E_v при использовании оценок LAI и В по данным AVHRR/3 для травяных растений и по данным MODIS невелики. Временной ход влагозапасов почвы W , рассчитанных для всех вариантов оценки LAI и В по данным AVHRR и MODIS, оказался весьма близок временно-

му ходу их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис.4). Аналогичные результаты были получены и для потоков явного тепла. Косвенная проверка адекватности произведенных оценок выполнялась путем сравнения модельных и спутниковых оценок ТПП, а также рассчитанных по модели и измеренных температур почвы под растительным покровом на глубинах 20 и 40 см.

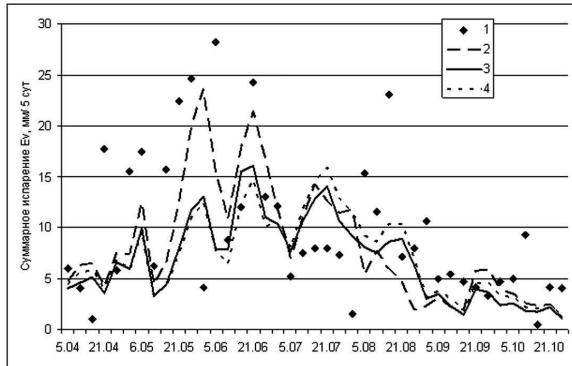


Рис. 3. Значения суммарного испарения E_v для сезона вегетации 2008 г.: измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и многолетних трав (4) и при оценках LAI по данным MODIS (3)

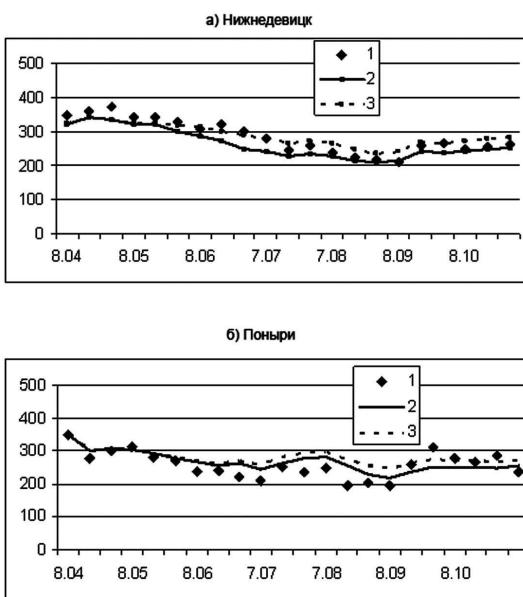


Рис. 4. Временной ход влагозапасов почвы (в мм слоя), измеренных на агрометеостанциях под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и по данным MODIS (3) для сезона вегетации 2008 г.

Расчеты составляющих водного и теплового балансов производились также при введении в модель спутниковых оценок LAI и ТПП за конкретные сроки, соответствовавшие моментам пролета спутника. Расхождения результата такого расчета E_v с аналогичными результатами, полученными при использовании оценок LAI и ТПП, осредненных по времени в процессе циклических модельных просчетов, лежат в пределах стандартной ошибки оценки суммарного испарения. Таким образом, все описанные результаты подтверждают сделанный в [3, 4] вывод о возможности использования спутниковых оценок LAI и В в качестве параметров модели, а ТПП – в качестве ее переменной.

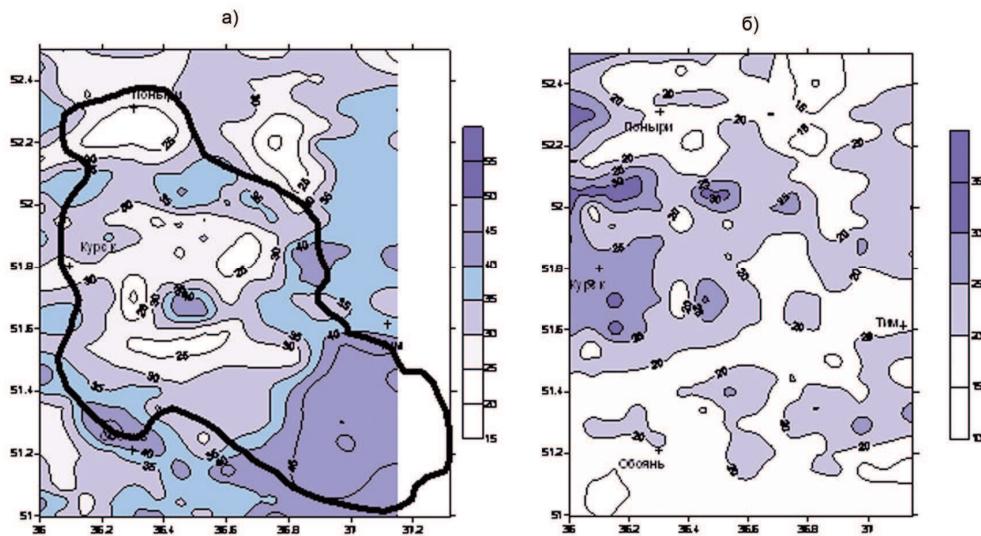


Рис. 5. Потоки скрытого тепла LE, рассчитанные по модели с учетом пространственных распределений оценок LAI и температуры подстилающей поверхности по данным AVHRR/3 для территории, включающей водосбор р.Сейм, на 14 ч. местного времени 6 июня (а) и 26 июля (б) 2008 г.

Разработанная процедура ввода в модель в каждом узле ее вычислительной сетки спутниковых оценок LAI, В и ТПП, а также значений интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, полученных в результате интерполяции данных сетевых наблюдений, использовалась при расчетах составляющих водного и теплового балансов в узлах сетки с последующим построением полей этих величин на всей исследуемой территории. На рис.5 для двух дат сезона вегетации 2008 г. представлены распределения по площади рассматриваемого участка потоков скрытого тепла LE, рассчитанных по модели с учетом распределений по этой же площади оценок LAI и ТПП по данным AVHRR/3. Рассчитанные по таким же данным распределения влагозапасов почвы W для двух дат сезона вегетации 2008 г. изображены на рис. 6. Проверка адекватности построенных распределений производилась для пунктов нахождения агрометеостанций. Таким образом показана возможность расчета вертикальных потоков влаги и тепла с покрытыми растительностью участков суши при использовании спутниковых оценок характеристик подстилающей поверхности, полученных с учетом реального распределения их значений по площади.

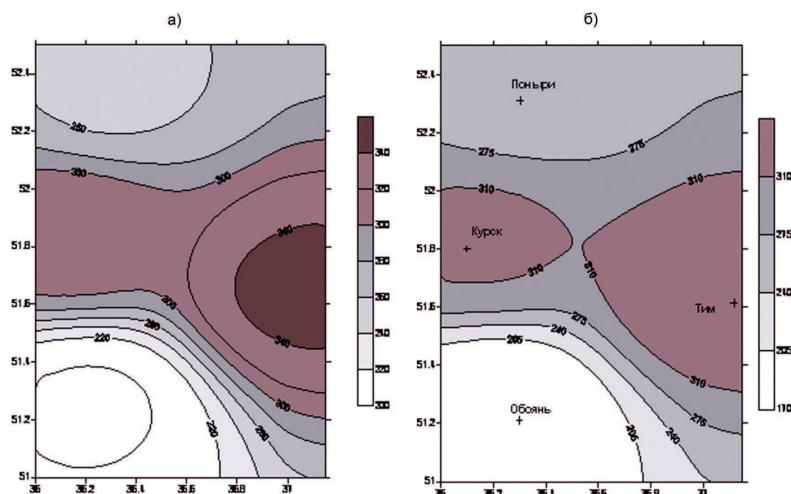


Рис.6. Влагозапасы почвы, рассчитанные по модели с учетом пространственных распределений оценок LAI и температуры подстилающей поверхности по данным AVHRR/3 для территории, включающей водосбор р.Сейм, на 14 ч. местного времени 6 июня (а) и 24 сентября (б) 2008 г.

Заключение

Основные результаты настоящей работы состоят в следующем.

1. Разработана и усовершенствована технология получения оценок характеристик ПП по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua.

2. Описана 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 усвоения в модели полученных по спутниковым данным AVHRR и MODIS 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. Реализация предложенного подхода продемонстрировала возможность построения полей значений составляющих водного и теплового балансов для территорий, покрытых растительностью, в том числе для характеризующихся недостатком данных наземных наблюдений.

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

Литература

1. *Kuchment L.S., Startseva Z.P.* Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture in wheat fields to changes in climate and direct effects of carbon dioxide // *Hydrol. Sci. J.* 1991. V.36. № 6. P.631-643.
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. *Волкова Е.В., Успенский А.Б.* Детектирование облачности и определение ее параметров по спутниковым данным в светлое время суток // *Метеорология и гидрология*, 2007. № 12. С.5-20.

The model of vertical water and heat transfer in the "soil-vegetation-atmosphere" system (SVAT) has been developed designing for calculation of water and heat balance components as well as vertical soil temperature and moisture distributions and soil surface and foliage temperatures. The model is meant for utilizing estimates of vegetation characteristics and land surface temperature (LST) retrieved from AVHRR/NOAA and MODIS/EOS Terra & Aqua measurement data in cloud-free conditions. Calculations have been carried out for the part of the Kursk region with area about 10000 km² for vegetation seasons of 2005-2008.

To provide effective assimilation of satellite data in the SVAT model the ability has been investigated to replace ground-based estimates of leaf area index LAI, vegetation cover fraction B and LST using as the model parameters and input variable, correspondingly, by their AVHRR- or MODIS-based analogues. The approach has been also developed to account for space variability of above satellite-derived estimates. The SVAT model calculations of water and heat balance components, as well as vegetation cover and soil surface temperatures for region under investigation have been carried out for different scenarios of LAI and B estimating from AVHRR/3, MODIS, and ground-based data for named vegetation seasons. The acceptable accuracy levels of above values assessment have been achieved under all scenarios of parameter and input model variable specification.

Keywords: modeling water and heat transfer, satellite data thematic processing, space variability of land surface characteristics.