

Определение характеристик подстилающей поверхности по данным радиометров AVHRR и MODIS и их использование в модели вертикального тепло- и влагопереноса для речного водосбора

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

¹*Институт водных проблем РАН
119333, Москва, ул. Губкина, 3
E-mail: muzylev@aquas.laser.ru*

²*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"
Росгидромета
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 7
E-mail: uspensky@planet.iitp.ru*

Разработаны методы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua для дистанционного определения температуры подстилающей поверхности и характеристик растительности. С помощью созданных комплексов программ для сезонов вегетации 2003-2005 гг. по данным AVHRR при безоблачных условиях получены оценки температуры T_g и излучательной способности E почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры поверхности $T_{s,eff}$, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B , а по данным MODIS – оценки $T_{s,eff}$, E , NDVI, LAI для центрального региона России, включающего водосбор р. Сейм (Курская область) площадью 7460 км². Выявлено хорошее совпадение спутниковых оценок температур, полученных по данным AVHRR и MODIS. Проанализирована статистика ошибок этих оценок.

Полученные по спутниковым данным оценки перечисленных температур и характеристик растительности использованы для калибровки и верификации разработанной модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT) и вычислений с ее помощью суммарного испарения, тепло- и влагозапасов почвы, потоков скрытого и явного тепла и других составляющих водного и теплового балансов. Подтверждены возможности расчета этих величин при использовании в качестве параметров модели спутниковых оценок LAI и B , а в качестве ее входной переменной – спутниковых оценок температуры подстилающей поверхности.

Введение

В настоящее время к моделированию вертикальных потоков тепла и влаги с поверхности суши как к методу исследования условий формирования водного и теплового режимов различных территорий проявляется повышенный интерес. Разработанные для разных пространственных масштабов модели вертикального влаго- и теплопереноса в системе "почва – растительность – атмосфера" (типа SVAT) используются при решении разнообразных задач: получения оценок выноса CO₂ и других парниковых газов; детализации описания процессов формирования речного стока; оценки потоков тепла и влаги с различных по размерам территорий (в том числе для климатических и биосферных моделей; исследования влияния антропогенных факторов на ход процессов водо- и теплообмена. Основные трудности моделирования процессов переноса тепла и влаги для различных по размерам участков суши связаны с недостатком данных наземных наблюдений, позволяющих производить корректный учет пространственной неоднородности рельефа, почв, растительного покрова и изменчивости метеорологических характеристик. Использование в моделях типа SVAT данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников, в частности, результатов измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS-Terra и Aqua, значительно расширяет возможности получения достоверных оценок характеристик подстилающей поверхности

как для их введения в модель в качестве параметров и входных переменных, так и для ее валидации, что приводит к повышению точности расчета потоков тепла и влаги с поверхности суши. Анализ спутниковых данных позволяет выполнять регулярное картирование полей радиационной и термодинамической температуры и альбедо подстилающей поверхности, получать оценки температуры и влажности воздуха в приземном слое, а также характеристик растительности (индекса вегетации NDVI, относительной площади листьев LAI, проективного покрытия В). Перечисленные спутниковые информационные продукты могут использоваться в задачах моделирования водного и теплового режимов территории речного водосбора для калибровки и верификации модели SVAT, для классификации типов землепользования, для построения связей между измеренной радиационной температурой и характеристиками растительности, влажностью воздуха, суммарным испарением, а также для анализа связей названных характеристик растительности между собой.

Для адаптации модели к спутниковым данным ДЗЗ требуется, наряду с количественными оценками их достоверности, согласование пространственных и временных масштабов в процессе усвоения результатов наземных и спутниковых наблюдений при оценке искомых потоков тепла и влаги (в частности, согласование детальности описания характеристик почв и растительности на водосборе с пространственным разрешением данных ДЗЗ).

С учетом сказанного основные цели настоящей работы включают: а) получение по спутниковой информации оценок температуры поверхности почвы T_g и воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, а также вегетационного индекса NDVI, проективного покрытия растительностью В и листового индекса LAI; б) разработку процедур усвоения в модели SVAT названных характеристик для расчетов с ее помощью вертикальных потоков тепла и влаги и других составляющих водного и теплового балансов, а также упомянутых температур.

Исследования проводились на примере водосбора р. Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км² для сезонов вегетации 2003-2005 гг.

Методы обработки и анализа спутниковых данных

Приведем краткое описание использованных методов анализа и обработки спутниковой информации для получения данных ДЗЗ указанного выше состава. Исходная спутниковая информация включает измерения с помощью радиометра AVHRR/3, установленного на полярно-орбитальных метеорологических спутниках серии NOAA (NOAA-17, -18), а также измерения с помощью радиометра MODIS, установленного на полярно-орбитальных спутниках EOS/Terra и Aqua. Для анализа привлекались спутниковые данные, покрывавшие территорию водосбора р. Сейм (Курская обл.) за сезоны вегетации 2003-2005 гг.

1. Анализ данных измерений AVHRR/3

Методы и алгоритмы тематической обработки измерений AVHRR/3 для получения перечисленных во Введении данных ДЗЗ достаточно детально рассмотрены в [1, 2], поэтому здесь мы ограничимся их кратким описанием, уделяя внимание произведенным в последнее время доработкам и модификациям.

На первом этапе тематической обработки данные AVHRR/3 классифицируются как измерения, полученные при отсутствии или наличии облачности в поле зрения прибора. Детектирование облачности представляет необходимую стадию анализа спутниковой информации, поскольку данные измерений AVHRR/3 в "облачных" пикселах и пикселах с частичной облачностью непригод-

ны для дистанционного определения характеристик подстилающей поверхности. В усовершенствованном по сравнению с [1] варианте методики детектирования облачности и построения маски "ясно-облачно" введены дополнительные предикторы и уточнены формулы для расчета динамических порогов в решающих правилах, что повышает точность выделения пикселей, частично заполненных облачностью. Дальнейшие детали описания и применения указанного варианта методики детектирования облачности можно найти в [2]. Важно отметить, что использование данных AVHRR в пикселях, детектированных почти со 100%-ной вероятностью как безоблачные, ведет к повышению точности результатов. Это подтверждается статистикой ошибок результатов зондирования за 2003-2005 гг.

После детектирования облачности по данным "безоблачных" измерений AVHRR/3 определяются: температура воздуха на уровне будки T_a ; температура T_g и излучательная способность E поверхности почвы; эффективная температура $T_{s,eff} = B T_{sv} + (1-B) T_{sg}$, где T_{sv} и T_{sg} – радиационные температуры на верхней границе растительного покрова и почвы, соответственно, B – доля покрытия поверхности растительностью; нормализованный индекс вегетации NDVI; листовой индекс LAI. Для определения T_a применялась линейная регрессионная оценка. Оценка T_g строилась с использованием известного метода "расщепленного окна прозрачности" (РОП) при априорном задании или расчете излучательных способностей E_4 и E_5 (для спектральных диапазонов 4-го и 5-го каналов радиометра AVHRR). Значение B определялось по формуле $B = (I - I_g)/(I_v - I_g)$, где I , I_g , I_v – индексы вегетации $NDVI = (A_2 - A_1)/(A_2 + A_1)$ для трех видов пикселей – рассматриваемого, без растительности и покрытого растительностью, соответственно; A_1 и A_2 – значения альбедо, измеренные в 1-м и 2-м каналах AVHRR. Оценка $T_{s,eff}$ строилась при упрощающих предположениях: $T_{sv}=T_a$, $T_{sg}=T_g$. Для оценки LAI использовались эмпирические (регрессионные) соотношения, связывающие NDVI и LAI.

Отметим ряд особенностей и "слабых" мест описанного метода тематической обработки данных AVHRR/3. Во-первых, гипотеза $T_a=T_{sv}$ выполняется только приближенно, т.к. по литературным данным температуры листовой поверхности T_{sv} и окружающего воздуха T_a отличаются друг от друга примерно на 2.0°C . Во-вторых, достоверность оценки B зависит от точности оценок I_g и I_v , которая меняется в зависимости от конкретного срока и покрытости растительностью. При низкой покрытости точность оценки величин I_g заметно ухудшается. Кроме того, регрессионная оценка T_a строится на основе совмещенных наземных (in-situ) точечных и спутниковых усредненных по пикселу измерений (AVHRR/3), причем наземные наблюдения выполняются в свободном от растительности месте. Точность оценивания T_a зависит главным образом от накопления репрезентативных обучающих выборок. Сказанное приводит к тому, что погрешности спутниковых оценок T_a и $T_{s,eff}$ могут возрастать для конкретных ситуаций. Поскольку на практике величина T_{sv} не измеряется, возможный способ уточнения $T_{s,eff}$ состоит либо в уточнении оценок B , либо в видоизменении формального определения $T_{s,eff}$ (без введения величины B). Оба эти варианта реализуются, если воспользоваться методикой TVX (temperature vegetation index). Эксперименты [3] по применению этой методики для тематической обработки выборок данных AVHRR/3 для Курского региона не выявили статистически значимого повышения достоверности оценок T_a и $T_{s,eff}$. Поэтому основные усилия по доработке методов тематической обработки данных AVHRR/3 были сосредоточены на более тщательном формировании обучающих выборок пар "спутниковые-наземные измерения".

2. Получение данных ДЗЗ по информации MODIS

Рассмотрим технологию подготовки и архивации данных ДЗЗ, получаемых на основе тематической обработки измерений радиометра MODIS/EOS-Terra и Aqua. Как известно, этот скани-

рующий радиометр видимого и ИК диапазонов спектра имеет 36 каналов в спектральном диапазоне 0.62-14.4 мкм и пространственное разрешение ~ 1 км при зондировании в надир, см., например, [4]. Значительное расширение состава измерений по сравнению с AVHRR/3 (36 каналов вместо 6) обеспечивает более достоверное детектирование облачности и построение маски "ясно-облачно", а также позволяет расширить номенклатуру и уменьшить погрешности результатов ДЗЗ (в частности, получать оценки $T_{s,eff}$, E, LAI с улучшенной точностью). Разнообразные данные ДЗЗ для всего мира, в том числе оценки $T_{s,eff}$, E, NDVI и LAI, регулярно получают в Центре GSFC/NASA (США) и размещают на веб-сайте LP DAAC. Оценки $T_{s,eff}$ и E строятся с помощью обобщенного метода РОП из [5, 6], в котором используются измерения MODIS в семи каналах (№№ 20, 22, 23, 29, 31-33) для темного времени суток и в четырех каналах (№№ 29, 31-33) для светлого времени. Оценки NDVI строятся стандартным образом. Для получения оценок LAI используется алгоритм [7]. В рамках данной работы подготовлена технология получения и формирования архива оценок характеристик подстилающей поверхности (температуры $T_{s,eff}$, E, NDVI и LAI) по данным MODIS (ИСЗ EOS/Terra и Aqua) для Курского региона и упомянутых сезонов вегетации. С ее помощью архивные файлы с результатами ДЗЗ указанного состава, полученными по данным MODIS для "гранул", покрывавших Курский регион, в сроки, ближайшие к измерениям AVHRR/3, загружались с веб-сайта LP DAAC. Далее выполнялись необходимые форматные преобразования, изменение проекции (переход от исходной синусоидальной к равномерной широтно-долготной) и выделение из гранул массивов данных, относившихся к Курскому региону. Пространственное разрешение оценок $T_{s,eff}$ и E составляет около 5 км, а оценок NDVI и LAI – 1 км, причем оценки NDVI и LAI получают за временной период в 8 дней. Для предварительного анализа достоверности этих данных оценки $T_{s,eff}$ и E сопоставлялись с ближайшими по времени и местоположению оценками этих же характеристик по данным AVHRR/3 за отдельные сроки тех же периодов вегетации. При этом различия значений $T_{s,eff}$, полученных по данным MODIS и AVHRR/3, не превышали величины погрешности ее оценки по данным AVHRR. Отметим также, что значения LAI, определенные по данным MODIS, как правило, больше по величине соответствующих значений LAI, определенных по данным AVHRR, однако при этом надо учитывать, что "мгновенные" оценки LAI (AVHRR/3) сопоставлялись с оценками LAI (MODIS), усредненными за период 8 дней, для построения которых использован алгоритм [7], отличный от алгоритма [3].

Описание модели SVAT

Физико-математическая модель SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) является моделью вертикального переноса влаги и тепла в системе "почва-растительность-атмосфера", разработанной для оценки испарения с поверхности почвы, транспирации растительности, вертикальных потоков скрытого и явного тепла, распределений влажности и температуры почвы по глубине, температуры поверхностей растительного покрова и почвы. Поскольку описание модели приводилось в наших предшествующих работах [3, 8], мы здесь лишь кратко отметим ее основные особенности. Подстилающая поверхность представляется в модели в виде двух слоев – растительного и почвенного покровов, поэтому поступающие к ним и уходящие от них потоки тепла и влаги рассматриваются по отдельности. Для описания испарения с поверхности голой почвы E_g и транспирации растительности E_f , скрытого LE_g и LE_f и явного H_g и H_f потоков тепла используются следующие полуэмпирические формулы:

$$E_g = \rho_a \cdot (r \cdot q^*(T_g) - q_{af}) / r_{ag}, \quad E_f = \rho_a \cdot (q^*(T_f) - q_{af}) \text{ LAI} / (r_a + r_s),$$

$$H_g = \rho_a \cdot c_p \cdot (T_g - T_{af}) / r_{ag}, \quad H_f = \rho_a \cdot c_p \cdot (T_f - T_{af}) / r_{af},$$

где $q^*(T_g)$ и $q^*(T_f)$ - удельные влажности насыщения при температурах поверхности почвы T_g и растительного покрова T_f ; T_{af} и q_{af} - средняя температура и удельная влажность воздуха в межли-

стном пространстве; g - 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, c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; L – удельная теплота парообразования. Вертикальный перенос воды в почве описывается уравнением диффузии влаги, в котором учитывается ее поглощение корнями растений, с верхним граничным условием в виде уравнения водного баланса для приповерхностного слоя почвы. Поток влаги через нижнюю границу ее деятельного слоя, равный гидравлической проводимости, представляет нижнее граничное условие. Оценки коэффициента гидравлической проводимости почвы, коэффициента диффузии и потенциала почвенной влаги производятся с помощью эмпирических формул, предложенных Клаппом и Хорнбергером [9]. Температурный режим почвы описывается уравнением теплопроводности, а тепловой режим растительности - уравнением теплового баланса в пренебрежении теплосодержанием растительного покрова. Значения T_f определяются из последнего уравнения, а значения T_g - из уравнения теплового баланса для верхнего слоя голой почвы, являющегося, в свою очередь, верхним граничным условием для уравнения теплопроводности. Нижнее граничное условие задается уходящим из деятельного слоя к более глубоким горизонтам потоком тепла, пропорциональным градиенту температур. Начальные условия для уравнений влагопереноса и теплопроводности представляются вертикальными профилями влажности и температуры почвы, измеренными на момент начала вегетации на находящиеся на водосборе агрометеостанциях. Входными переменными модели являются температура, влажность и давление воздуха, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация, значения которых определяются по данным стандартных сетевых метеорологических наблюдений. Система описанных уравнений решалась численно с трехчасовым шагом по времени.

Пространственная неоднородность характеристик водосбора учитывалась в модели путем деления его площади на элементарные участки, соответствовавшие определенным метеоусловиям, а также основным типам почв и видам растительности. Для описания каждой из выделенных почв использовались такие параметры, как объемный вес, наименьшая полевая влагоемкость, максимальная гигроскопичность, пористость и коэффициент фильтрации. Неоднородность растительного покрова характеризовалась минимальным устьичным сопротивлением, листовым индексом LAI, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений. Величины суммарного испарения, тепловых потоков и других компонент водного и теплового балансов для всего водосбора вычислялись как средневзвешенные с учетом размеров площадей, занятых каждым видом растительности для каждого из типов почв.

Для согласования пространственных масштабов результатов расчетов по модели с результатами обработки спутниковых данных был осуществлен переход от описанной схематизации водосбора к регулярной сетке с ячейкой размером 3×3 пиксела ($\sim 5 \times 7$ км²), производившийся с учетом весов площадей упомянутых элементарных участков в пределах каждой ячейки сетки. Рассчитанные по модели в узлах сетки температуры поверхности растительного покрова T_f и почвы T_g , а также радиационная температура подстилающей поверхности T_s сравнивались, соответственно, с определенными по данным AVHRR температурой воздуха у листовой поверхности T_a (принимавшейся равной радиационной температуре верхней границы растительного покрова T_{sv}), температурой поверхности почвы T_{sg} и эффективной температурой поверхности $T_{s,eff}$. Эти же значения T_s сопоставлялись и с оценками температуры подстилающей поверхности, полученными по данным MODIS. Температура T_s , как и в работе [10], рассчитывалась в модели по уравнению для длинноволновой части радиационного баланса $\sigma T_s^4 = R_a - R_{lf} - R_{lg}$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, R_{lf} и R_{lg} - длинноволновые составляющие радиационного баланса для растительного покрова и оголенной почвы, R_a - противоизлучение атмосферы, определявшееся с использованием эмпирической зависимости от температуры воздуха, давления водяного пара и облачности [11].

Подбор значений параметров модели и ее верификация производились с использованием данных наблюдений на агрометеостанциях водосбора по результатам сравнения рассчитанных и фактических вертикальных профилей влажности и температуры почвы, величин радиационного баланса, значений температур поверхности почвы и поверхности растительного покрова (последняя сравнивалась с температурой воздуха), а также вычисленных и измеренных значений суммарного испарения. Также в узлах регулярной сетки и в точках местонахождения агрометеостанций проводилось описанное сопоставление модельных и спутниковых оценок температур, результаты которого показали, что разности значений $T_s - T_{s,eff}$, $T_f - T_a$ и $T_g - T_{sg}$ для большинства сроков каждого из рассматривавшихся сезонов вегетации не превышали значений погрешностей оценки T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ по данным AVHRR.

Основные результаты

Усовершенствование и верификация алгоритмов тематической обработки данных измерений AVHRR, созданных ранее для дистанционного определения T_a , T_g , $T_{s,eff}$, NDVI, LAI [1, 3], производились на базе сформированного архива данных синхронных спутниковых и наземных агрометеорологических наблюдений для территории, включающей водосбор р.Сейм, за сезоны вегетации 2003-2005 гг. Этот архив содержит результаты измерений радиометра AVHRR/3 ИСЗ NOAA-18 в шести каналах с разрешением $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе, данные наблюдений за температурой воздуха и поверхности почвы на шести находящихся на водосборе и вблизи его границ агрометеостанциях Курской и Воронежской областей и собственно результаты обработки и анализа данных AVHRR – оценки температур T_{sg} , T_a , $T_{s,eff}$ и излучательной способности подстилающей поверхности E , а также NDVI, B и LAI. Архив является продолжением сформированного ранее архива указанного состава за сезоны вегетации 1997, 1999-2002 гг. Оценки всех названных величин строились для фрагментов изображения размером 3×3 пиксела, соответствовавших ячейке вычислительной сетки модели. Для оценки точности дистанционного определения по данным AVHRR величин T_a , $T_{s,eff}$, T_{sg} использовалась выборка ближайших по времени пространственно совмещенных спутниковых и наземных измерений. Так, для сезона 2004 г. среднее квадратическое отклонение спутниковых оценок от данных наземных измерений составило: для T_a – 2.2-2.7, для T_{sg} – 3.4-4.8, для $T_{s,eff}$ – 2.4-3.5°C. Наибольшие расхождения спутниковых оценок и результатов наземных измерений для отдельных сроков зафиксированы в жаркие дни лета, они могут быть обусловлены локальным перегревом поверхности (до +50°C и выше), несовпадением моментов времени спутниковой съемки и наземных наблюдений, а также естественной генерализацией спутниковых данных. Собранный архив для сезонов вегетации 2003-2005 гг. был расширен за счет оценок $T_{s,eff}$, E , NDVI, LAI, полученных по данным MODIS. Значения $T_{s,eff}$ (MODIS) для конкретных сроков этих сезонов вегетации сравнивались с квазисинхронными пространственно совмещенными оценками $T_{s,eff}$ по данным AVHRR. Максимальные значения разности оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR/3) лежали в диапазоне 2.5-3.5°C, а среднеквадратичные отклонения оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) от значений температур, полученных по данным наблюдений на агрометеостанциях, составляли 2.5-4.0°C, что говорит о приемлемом качестве результатов ДЗЗ по данным радиометра MODIS.

Определенные по данным AVHRR и MODIS значения температур подстилающей поверхности и характеристик растительности из имеющегося архива использовались при разработке процедур усвоения спутниковых оценок этих величин в модели SVAT. Эта разработка включала: 1) уточнение значений параметров модели по результатам сравнения рассчитанных и фактических значений радиационного баланса и составляющих водного баланса, а также сопоставления модельных оценок T_s , T_f и T_g и спутниковых оценок $T_{s,eff}$, T_a и T_{sg} ; 2) подтверждение выявленной ра-

нее [8] возможности замены значений LAI и В, определенных по данным наземных наблюдений, на спутниковые оценки этих величин; 3) выявление возможности использования оценок температур подстилающей поверхности, полученных по данным AVHRR и MODIS, в качестве переменных модели при согласовании моментов времени спутниковых и наземных наблюдений; 4) проведение расчетов суммарного испарения, влагосодержания почвы, вертикальных потоков скрытого и явного тепла и других составляющих водного и теплового балансов для находящихся на водосборе агрометеостанций и для всего водосбора в целом при различных вариантах оценки LAI и В для названных сезонов вегетации по наземным данным и по данным AVHRR и MODIS.

Задание временного хода таких параметров модели, как LAI, характеризующих затенение поверхности и в значительной мере определяющих динамику процессов испарения и транспирации, выполнялось с помощью эмпирических зависимостей LAI от высоты растений, построенных по результатам фитометрических наблюдений на агрометеостанциях [12]. Значения LAI корректировались по результатам упомянутого выше сравнения спутниковых и модельных оценок температур. Оценки LAI по данным AVHRR производились с использованием его эмпирической зависимости от индекса вегетации NDVI: $LAI = NDVI \cdot 1.71 + 0.48$ для травянистых растений [13] и $LAI = -2.5 \cdot \ln(1.2 - 2 \cdot NDVI)$ для сельскохозяйственных культур [14]. Рассчитанные по этим формулам значения LAI сравнивались с полученными по данным наземных наблюдений и по данным MODIS. Сравнение временных ходов LAI, построенных по всем этим данным для каждого из рассматриваемых вегетационных периодов, показало, что оценки LAI (MODIS) лежат между оценками LAI (AVHRR) для сельскохозяйственных культур и для травянистых растений и близки к оценкам LAI по наземным данным для травянистых участков. На рис. 1 представлены результаты такого сравнения временных ходов LAI для различных культур на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г. Расхождения оценок LAI по данным AVHRR и MODIS вызваны, скорее всего, разли-

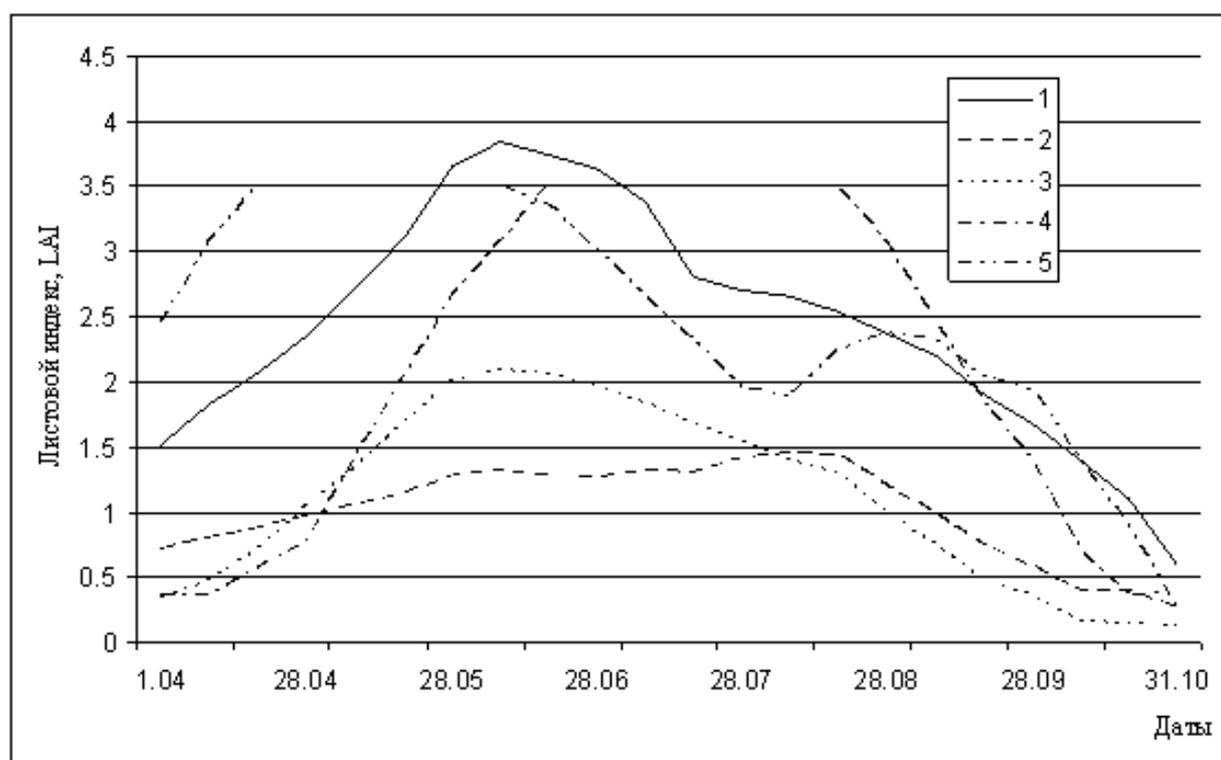


Рис. 1. Временной ход листового индекса LAI, построенный по данным AVHRR для сельскохозяйственных культур (1) и травянистых растений (2), по данным MODIS (3) и по данным наземных наблюдений для участков с сахарной свеклой (4) и озимой пшеницей (5) на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г.

нием процедур осреднения этих данных, а также использованием разных эмпирических формул для определения LAI. Расчет проективного покрытия B производился по формуле $B=1-\exp(-r \cdot LAI)$, где r – эмпирический коэффициент, значения которого подбирались по результатам такого же, как и выше, сопоставления спутниковых и модельных оценок температур при использовании значений LAI, определявшихся по данным AVHRR и по наземным данным для разных культур. Оценка значений B по данным AVHRR производилась в соответствии с [15] при использовании эмпирических зависимостей от NDVI. Численные эксперименты с моделью для всех рассматривавшихся сезонов вегетации выявили наибольшую близость спутниковых и модельных оценок температур при $r = 0.39$ при разбросе значений r от 0.33 до 0.45. На рис. 2 приведены примеры временного хода величин B , определённых по данным AVHRR/NOAA и по данным наземных наблюдений для разных культур на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г. Различия значений B для разных сезонов могут быть связаны с различиями объемов зеленой массы, а следовательно и значений LAI. При проведенных численных экспериментах сравнение величин T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} с T_f , T_s и T_g для всех шести агрометеостанций и названных вегетационных периодов производилось для разных вариантов задания значений LAI и B по наземным данным и данным AVHRR. Как и при расчетах, проводившихся для сезонов вегетации 1999-2002 гг. [3], наиболее близкими оказались спутниковые оценки T_a и модельные T_f , расхождения между которыми не превышали приведенных выше значений погрешности определения T_a по спутниковым данным

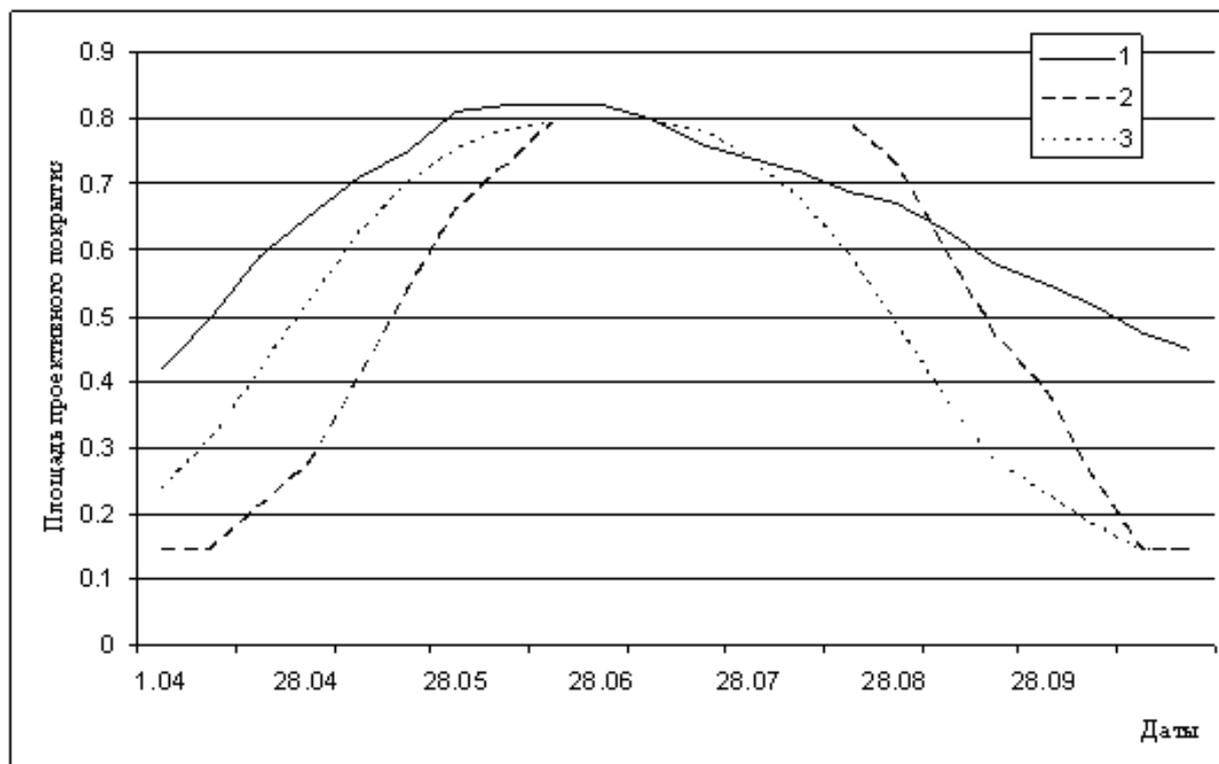


Рис. 2. Временной ход проективного покрытия B , построенный по измерениям AVHRR (1) и по данным наземных наблюдений для участков с сахарной свеклой (2) и озимой пшеницей (3) на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г.

для всех вариантов задания LAI и B . При спутниковых оценках $T_{s,eff}$ и T_{sg} и модельных T_s и T_g наибольшие отличия T_{sg} от T_g и $T_{s,eff}$ от T_s были зафиксированы при использовании в модели определенных по данным AVHRR значений LAI и B , однако для подавляющего большинства сроков эти отличия не превышали приведенных значений погрешности оценки $T_{s,eff}$ и T_{sg} по спутниковым данным. Исключения составили всплески значений T_s и T_g в периоды скашивания травянистых культур (из-за заметного отклонения значений LAI, определенных по данным наземных наблюдений).

ний, от спутниковых оценок) и в дни, когда отмечались местные перегревы поверхности почвы (до $+50^{\circ}\text{C}$ и выше) при ее иссушении. Кроме того, производилось сравнение значений $T_{s,eff}$, полученных по данным MODIS, для отдельных сроков и их временного хода за весь сезон (для всех агрометеостанций и отдельных ячеек вычислительной сетки модели) с аналогичными значениями и временным ходом, построенными по данным AVHRR, а также с результатами расчетов по модели с использованием наземных и спутниковых оценок LAI и В. Значения $T_{s,eff}$ (MODIS) сопоставлялись и со значениями температуры воздуха, измеренной на агрометеостанциях. Наилучшие совпадения были зафиксированы для значений $T_{s,eff}$, определенных по данным MODIS и AVHRR, а также по данным MODIS и модельным расчетам с использованием оценок LAI и В по данным AVHRR. В обоих случаях расхождения полученных оценок находились в пределах погрешности определения $T_{s,eff}$ по данным AVHRR. Пример сравнения временных ходов величины $T_{s,eff}$, определённой по данным AVHRR и MODIS, величины T_s , рассчитанной по модели при оценках LAI по данным AVHRR и MODIS, и температуры воздуха T_a над участком с многолетними травами на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г. приведен на рис. 3.

С помощью разработанной версии модели, рассчитанной на использование в качестве параметров наземных и спутниковых оценок LAI и В, вычислялись 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

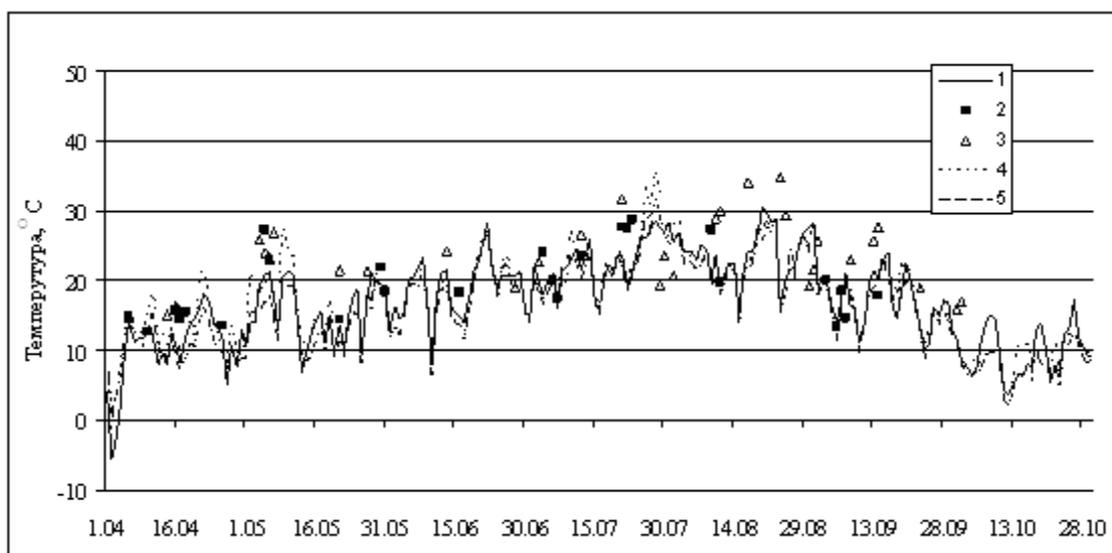


Рис. 3. Временной ход температуры воздуха, T_a , измеренной над участком с озимой пшеницей на агрометеостанции Тим (1), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности, $T_{s,eff}$, определённой по данным AVHRR (2) и MODIS (3) и вычисленной по модели, T_s , при использовании оценок LAI по данным AVHRR для сельскохозяйственных культур (4) и MODIS (5) для сезона вегетации 2004 г.

тепла, теплосодержание почвы. Расчеты проводились для каждой из агрометеостанций и для всего водосбора р.Сейм для сезонов вегетации 2003-2005 гг. Точность оценок E_v проверялась путем сравнения его рассчитанных и измеренных значений, а при отсутствии измерений – по результатам сопоставления его значений, вычисленных при различных вариантах оценки LAI и В. Как и при расчетах за несколько предыдущих сезонов вегетации [8], для всех вариантов задания LAI и В различия значений E_v для большинства сроков наблюдений не превышали нескольких мм за декаду (рис. 4), что лежит в пределах стандартной ошибки оценки испарения. Резкие отскоки значений E_v для зерновых в начале сезона и в периоды уборки и покосов в 2004 г. могут объясняться

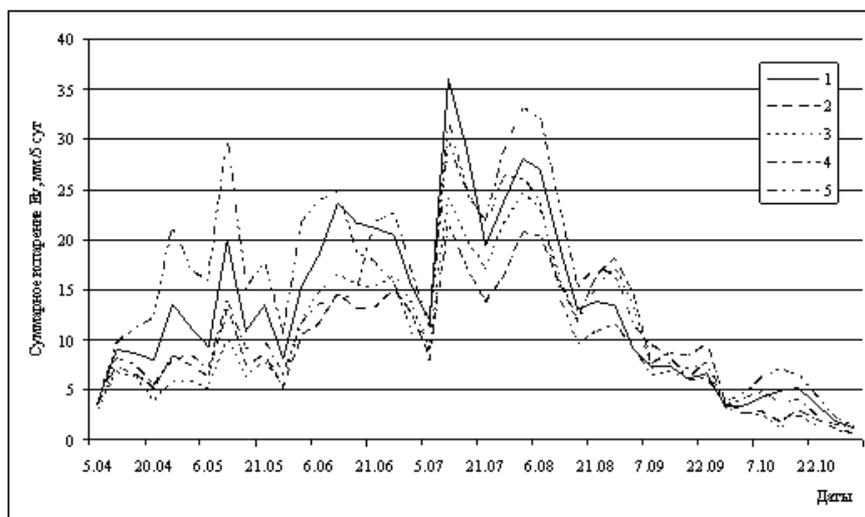


Рис. 4. Временной ход рассчитанного по модели суммарного испарения при оценках LAI и B по данным AVHRR для сельскохозяйственных культур (1) и многолетних трав (2), по данным MODIS (3) и по наземным данным для участков с сахарной свеклой (4) и озимой пшеницей (5) на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г.

несоответствием площадных спутниковых и точечных наземных измерений, а также изменением типов землепользования в данный сезон, приведшим к неточным оценкам LAI. Кривые временного хода E_v , построенного при оценках LAI по данным MODIS, для всех рассматривавшихся сезонов вегетации занимают промежуточное положение между аналогичными кривыми, построенными при расчетах E_v по данным AVHRR для травянистых и сельскохозяйственных культур, причем в первой половине сезона кривые E_v (с LAI (MODIS)) близки к кривым E_v (с LAI (AVHRR)) для трав, а во второй – к кривым для сельскохозяйственных культур. При этом несовпадения временного хода E_v (с LAI (MODIS)) с построенным по данным наземных наблюдений на травянистых участках были невелики. Временной ход влагозапасов почвы W , рассчитанный для всех вариантов задания LAI и B по наземным данным и данным AVHRR и MODIS, также оказался весьма близок временному ходу их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис. 5). На рис.6а,б

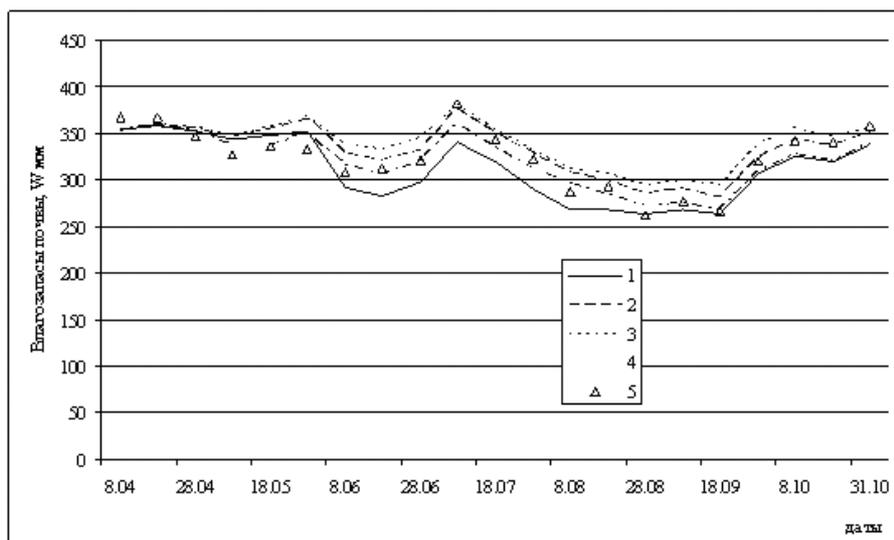


Рис. 5. Временной ход влагозапасов почвы W , рассчитанных по модели при оценках LAI и B по данным AVHRR для сельскохозяйственных культур (1) и многолетних трав (2), по данным MODIS (3) и по наземным данным для участков с сахарной свеклой (4) и озимой пшеницей (5) и измеренных под сахарной свеклой (6) на агрометеостанции Тим для сезона вегетации 2004 г.

приведены результаты расчетов интенсивности потоков скрытого LE и явного H тепла с подстилающей поверхности для сезона вегетации 2003 г. при оценках LAI и B по данным наземных измерений для участка с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк и по данным AVHRR и MODIS. Как и для E_v , кривые временного хода H, построенные при использо-

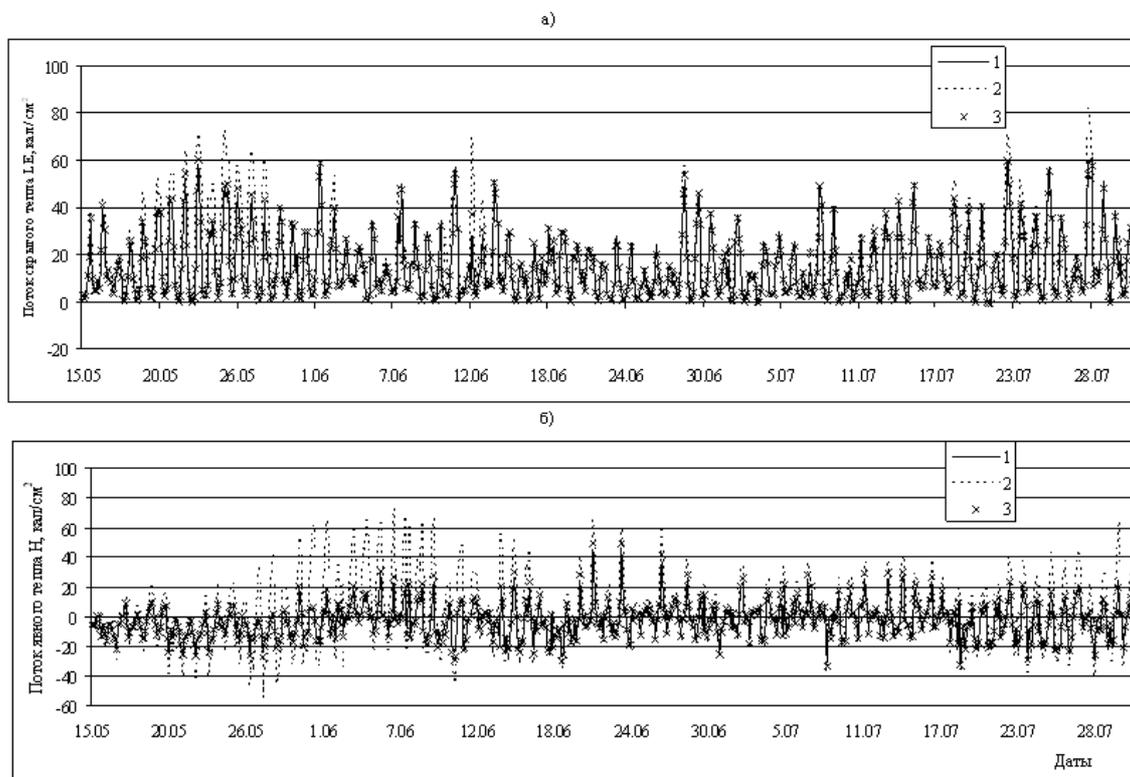


Рис. 6. Потоки скрытого (а) и явного (б) тепла, рассчитанные по модели при определении LAI и B по данным AVHRR для травянистых культур (1), по данным MODIS (2) и по наземным данным для участка с многолетними травами (3) на воднобалансовой станции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

вании LAI (MODIS), располагаются между кривыми, соответствующими LAI (AVHRR) для зерновых и травянистых культур, будучи ближе к последним. Косвенная проверка адекватности полученных оценок H производилась путем сравнения модельных и спутниковых оценок температуры подстилающей поверхности, а также рассчитанных по модели и измеренных температур почвы под растительным покровом на глубинах 20 и 40 см (рис. 7). Небольшие различия между

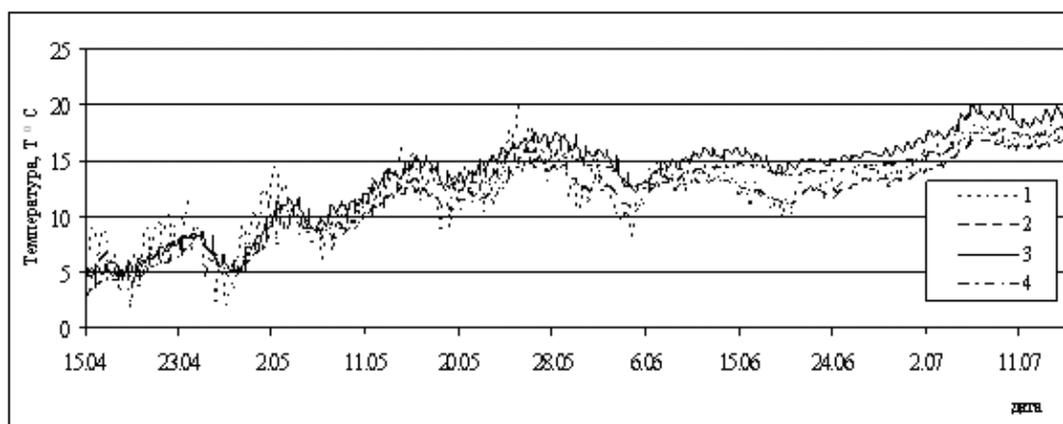


Рис. 7. Температура почвы под растительным покровом, рассчитанная по модели для глубин 20 (1) и 40 (2) см, и измеренная на тех же глубинах (3) и (4) для участка с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

кривыми для H , построенными для всех вариантов задания LAI и B по наземным и спутниковым данным, свидетельствуют о корректности полученных оценок. Подобные результаты получены и для теплосодержания метрового слоя почвы. Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность использования спутниковых оценок LAI и B в качестве параметров модели SVAT для расчетов составляющих водного и теплового балансов.

При разработке процедур адаптации модели к спутниковой информации исследовалась возможность использования полученных по данным AVHRR и MODIS оценок температур подстилающей поверхности в качестве переменных модели. Решающим фактором для реализации такой возможности является совпадение или близость моментов времени съемки со спутников, результаты обработки которой вводятся в модель, и срочных наземных наблюдений. При рассогласовании этих моментов времени расхождения значений характеристик растительности и температур подстилающей поверхности за счет их внутрисуточного хода могут быть весьма значительными. Так, при трехчасовом временном интервале между моментами этих измерений величина LAI может возрасти или уменьшиться почти вдвое, а температура – измениться на 5 и более градусов (что превышает погрешности оценки и T_{a_s} и $T_{s,eff}$ по данным AVHRR). Сказанное подтверждается численными экспериментами с моделью – построением временного хода T_a и $T_{s,eff}$ и расчетом транспирации при полученных значениях LAI и температур. При таком временном интервале между измерениями отклонения значений температур и транспирации от традиционных были весьма велики. При близости моментов времени спутниковых и наземных наблюдений погрешность оценки транспирации, рассчитанной при введении в модель определенных по данным AVHRR или MODIS температур, находилась в стандартных пределах. Таким образом, применение подобного подхода дает возможность рассчитывать с приемлемой точностью вертикальные потоки тепла и влаги при прямом введении в модель значений температур подстилающей поверхности, полученных по данным AVHRR и MODIS.

Заключение

Основными результатами настоящей работы можно считать:

1) предложенные методы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и Aqua для оценки температур поверхности растительного покрова T_a , поверхности почвы T_g , радиационной температуры $T_{s,eff}$ и излучательной способности E подстилающей поверхности, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B ;

2) разработанную версию физико-математической модели SVAT, адаптированной к спутниковым оценкам названных характеристик с учетом их пространственной неоднородности, с помощью которой можно рассчитывать вертикальные потоки тепла и влаги, распределения влажности и температуры почвы по глубине, а также температуры почвенного и растительного покровов в течение вегетационного периода. При разработке модели установлена возможность использования в качестве ее параметров оценок LAI и B , полученных по данным радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA) и MODIS (ИСЗ EOS-Terra и Aqua), вместо их оценок по данным наземных измерений. Также выявлена возможность замены определенной по наземным данным температуры подстилающей поверхности, вводимой в модель в качестве переменной, на ее спутниковые оценки. Такое усвоение в модели результатов измерений со спутников подтверждено путем сравнения значений спутниковых и модельных радиационных и термодинамических температур, а также величин влагосодержания почвы и суммарного испарения. Выявленные расхождения спутниковых и модельных оценок этих температур, не превышавшие величин погрешности их определения по данным AVHRR, позволили использовать в модели SVAT результаты оценок температур, LAI и

В, полученных по данным AVHRR и MODIS, для расчета компонент водного и теплового балансов речного водосбора.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований – грант № 07-05-01030.

Литература

1. 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.
2. 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.
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.1-10.
4. EOS Data Products Handbook. Editors C.L.Parkinson & R.Greenstone. NASA/GSEC. Greenbelt, MD 20771.Oct. 2000. V.2. 256 p.
5. Wan Z., Li Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1997. V.35. № 4. P.980-996.
6. Wan Z. MODIS Land Surface Temperature Products // User's Guide. ICES, Univ. of California, Santa Barbara, March 2006. 35 p.
7. Kniazikhin Y., Martonchic J.V., Myneni R.B. et al. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data // J. Geophys. Res., 1998. V.103: P.32227-32275.
8. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В. Дистанционное определение характеристик подстилающей поверхности по данным сканирующих радиометров спутников NOAA и EOS/ Terra при моделировании вертикальных потоков влаги с речных водосборов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т.2. С.251-260.
9. Clupp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some hydraulic properties // Water Resources Research. 1978. V.14. № 4. P.601-604.
10. Taconet O., Bernard L., Vidal-Madjar D. Evapotranspiration over agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data // J. Clim. Appl. Meteorol., 1986. V.25. № 3. P.284-307.
11. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу // Л., Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
12. 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.
13. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS)*. Report № 27. // Ed. by BAHC Core Project Office. Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Germany, 1993. 103 p.
14. 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.
15. 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.