

Дистанционное определение характеристик подстилающей поверхности по данным сканирующих радиометров спутников NOAA и EOS/TERRA при моделировании вертикальных потоков влаги и тепла с речных водосборов

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

¹ *Институт водных проблем РАН
119991 Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 3*

E-mail: muzylev@aqua.laser.ru

² *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"
123242 Москва, Б. Предтеченский пер., 7*

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Разработаны и испытаны методы и алгоритмы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra для дистанционного определения температуры и излучательной способности почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова, эффективной радиационной температуры (взвешенной линейной комбинации первых двух температур), нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью В. С помощью этих алгоритмов по данным AVHRR за сезоны вегетации 1999-2004 гг. и MODIS за сезон вегетации 2003 г. при безоблачных условиях для блоков 3x3 и 5x5 пикселей получены оценки упомянутых характеристик для центрального региона России, включающего водосбор р.Сейм (Курская область) площадью 7460 км². Проанализированы статистика ошибок спутниковых оценок названных температур и зависимость погрешностей этих оценок от степени пространственно-временного согласования спутниковых и наземных наблюдений.

Предложена и испытана версия модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), предназначенная для расчета испарения с поверхности почвы, транспирации растительностью, тепловых потоков, распределений влажности и температуры почвы по глубине, а также температур растительного покрова и поверхности почвы для любого интервала времени в течение периода вегетации и рассчитанная на использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности. При разработке способов усвоения в модели этих данных произведены калибровка и верификация модели (путем сравнения оценок названных температур, полученных по модели и по информации AVHRR и MODIS, а также величин суммарного испарения и влажности почвы); проведено исследование возможности использования в качестве ее параметров спутниковых оценок LAI и В (также при сравнении спутниковых и модельных оценок температур); выполнены расчеты вертикальных потоков влаги для различных вариантов задания LAI и В по данным AVHRR и MODIS и по наземным данным, а также при использовании в качестве переменных модели определенных по данным AVHRR и MODIS значений температур подстилающей поверхности. Сравнение величин суммарного испарения и влагосодержания почвы, рассчитанных для всех вариантов задания параметров, и между собой и с результатами наземных измерений, показало приемлемую точность результатов полученных оценок.

Введение

В настоящее время одним из основных инструментов для расчета вертикальных потоков влаги и тепла с покрытых растительностью участков поверхности являются разработанные с разной степенью детальности модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT). Успешность использования таких моделей для оценки этих потоков и других составляющих водного и теплового балансов для разных по размерам территорий существенно зависит от точности задания параметров модели, которые могут определяться по данным измерений характеристик подстилающей поверхности. В связи с этим возможности исследования названных процессов с помощью модели в значительной мере определяются способами агрегации соответствующих характеристик поверхности, а также гидрометеорологических переменных. Поэтому в условиях недостатка или отсутствия данных наземных наблюдений для реализации модели крайне важной является возможность альтернативного получения информа-

ции об этих величинах, например, по спутниковым данным. Привлечение этих данных для оценки характеристик подстилающей поверхности, используемых в качестве параметров и входных переменных модели, для ее калибровки и верификации, а также для прямых расчетов позволяет определять значения потоков тепла и влаги с обширных территорий, слабо обеспеченных данными наземных наблюдений. Реализации подобных возможностей и посвящена настоящая работа, основные цели которой: 1) получение оценок температур подстилающей поверхности и воздуха у поверхности растительного покрова, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B с помощью разработанных программ тематической обработки данных радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и 2) разработка версии модели SVAT, адаптированной к упомянутым спутниковым данным для расчета названных температур, суммарного испарения, влагосодержания почвы и других составляющих водного баланса. Для исследований был выбран находящийся в лесостепной зоне Центральной части России водосбор р. Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км². Исследования проводились для сезонов вегетации 1999-2004 гг.

Методы и алгоритмы обработки и анализа спутниковых данных

Методы определения температуры T_g и излучательной способности ϵ почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, облачности, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B по данным измерений радиометра AVHRR/NOAA должны учитывать ослабление излучения в атмосфере вследствие его поглощения водяным паром, аэрозолем и другими газами, отличие значений ϵ от единицы и их зависимость от длины волны, а также временную изменчивость и пространственную неоднородность полей температур и ϵ [1]. Эти методы включают: 1) подготовку архивов синхронных спутниковых и наземных наблюдений; 2) разработку автоматизированных пороговых алгоритмов выделения безоблачных фрагментов на изображениях AVHRR; 3) разработку алгоритма определения величины B ; 4) разработку алгоритма для определения величины ϵ ; 5) построение и испытание линейных регрессионных зависимостей для определения T_a и алгоритма метода расщепленного окна прозрачности (РОП) для определения T_g ; а также построение оценки $T_{s,eff}$ как взвешенной линейной комбинации данных температур; 6) анализ статистики ошибок оценок T_a , T_g и $T_{s,eff}$ путём сравнения с данными наземных наблюдений. Поскольку перечисленные методы и алгоритмы достаточно подробно рассмотрены в [2], здесь мы ограничимся их кратким описанием.

Температура воздуха у поверхности растительного покрова T_{sv} определяется с помощью регрессионной зависимости $T_{sv}=a_1T_4+a_2(T_4-T_5)+a_3$, где T_4 и T_5 – яркостные температуры поверхности, измеренные в 4-ом (10,5-11,5мкм) и 5-ом (11,5-12,5мкм) каналах радиометра AVHRR. Оценка температуры поверхности почвы T_{sg} производится с помощью алгоритма РОП $T_{sg}=b_1T_4+b_2(T_4-T_5)+b_3(\epsilon_4+\epsilon_5)/2+b_4(\epsilon_4-\epsilon_5)+b_5$, где ϵ_4 и ϵ_5 – оценки излучательной способности для 4-го и 5-го каналов радиометра AVHRR, полученные с привлечением априорных моделей ϵ , разработанных для 31-го и 32-го каналов радиометра MODIS (EOS/Terra) для разных характерных типов поверхностей, а также с использованием эмпирических соотношений между ϵ и вегетационным индексом NDVI и/или между ϵ и проективным покрытием B по эмпирической формуле [3] $\epsilon = \epsilon_v \cdot B + \epsilon_g \cdot (1-B) + 0.06 \cdot B \cdot (1-B)$. Здесь ϵ_v и ϵ_g – "типичные" значения для различных почв и видов растительности. Значения B для каждого пиксела определялись по формуле $B = (NDVI - NDVI_g)/(NDVI_v - NDVI_g)$, где NDVI, NDVI_g, NDVI_v – индексы вегетации NDVI = $(A_2 - A_1)/(A_2 + A_1)$ для трех видов пикселов – рассматриваемого, без растительности и покрытого растительностью, соответственно; A_1 и A_2 – значения альбедо, измеренные в 1-м и 2-м каналах AVHRR. При этом NDVI_v и NDVI_g рассматривались как максимальное и минимальное значения NDVI в пределах всего изображения. Эффективная радиационная температура подстилающей поверхности $T_{s,eff}$

рассчитывалась как линейная комбинация T_{sv} и T_{sg} : $T_{s,eff} = B \cdot T_{sv} + (1-B) \cdot T_{sg}$. При упрощающих допущениях $T_{sv} = T_a$, $T_{sg} = T_g$ [4] $T_{s,eff} = B \cdot T_a + (1-B) \cdot T_g$. Для оценки LAI используются эмпирические соотношения, связывающие LAI и NDVI для сельскохозяйственных культур и травянистой растительности.

Поскольку адекватность оценок T_a , T_g и $T_{s,eff}$ зависит от ряда особенностей представленного метода (различия значений T_a и T_{sv} , достигающего, по литературным данным, 2°C ; достоверности оценки B , определяющейся точностью оценок $NDVI_g$ и $NDVI_v$; использования при построении спутниковых оценок T_a данных наземных измерений, проводившихся на участках поверхности, не покрытых растительностью), для дистанционного определения характеристик подстилающей поверхности с целью их введения в модель SVAT были привлечены данные многоканального радиометра MODIS ИСЗ EOS/Terra, точность оценок величин $T_{s,eff}$, ϵ , LAI по которым может быть выше точности аналогичных оценок по данным AVHRR/NOAA. Дело в том, что измерения MODIS выполняются в 36 каналах видимого и ИК диапазонов спектра вместо 5 или 6 каналов радиометров AVHRR. Пространственное разрешение измерений MODIS в большинстве каналов близко к разрешению данных AVHRR (около 1 км в надире), а для канала № 1 (0.6-0.8 мкм) даже выше (~ 250 м в надире). Это позволяет строить надежные процедуры детектирования облачности, и тем самым повышать достоверность результатов спутникового зондирования. К тому же существующие алгоритмы определения $T_{s,eff}$ и ϵ используют измерения в семи ИК каналах (вместо двух каналов AVHRR), что также должно улучшать точность результатов зондирования. С учетом сказанного для сезона вегетации 2003 г. при использовании Интернет ресурсов (сайт <http://daac.usgs.gov>) были получены файлы со спутниковыми оценками (по данным MODIS EOS/Terra) T_{sg} , $T_{s,eff}$, NDVI, LAI и излучательной способности ϵ подстилающей поверхности для области (т.н. "гранулы"), в которую входит территория водосбора р.Сейм. Далее с помощью специально созданного программного обеспечения были выполнены форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов спутникового зондирования. Для проверки адекватности полученных данных было проведено сопоставление оценок $T_{s,eff}$, построенных по информации MODIS и AVHRR.

Краткое описание модели SVAT

Модель вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва – растительность – атмосфера" (SVAT) предназначена для расчета суммарного испарения, распределений влажности и температуры почвы по глубине, а также температур поверхности почвы T_g и растительного покрова T_f для любого интервала времени в течение сезона вегетации. С помощью модели можно рассчитывать испарение с поверхности почвы, транспирацию растительности, перемещение влаги в корнеобитаемой зоне, а также вертикальные потоки скрытого и явного тепла. Поскольку подстилающая поверхность рассматривается в модели как сочетание двух слоев – почвы и растительности, суммарное испарение представляется в виде суммы двух потоков - испарения с оголенной почвы, E_g , и транспирации растительности, E_f :

$E_g = \rho_a \cdot (r \cdot q^*(T_g) - q_{af}) / r_{ag}$, $E_f = \rho_a \cdot (q^*(T_f) - q_{af}) \cdot LAI / (r_a + r_s)$, где $q^*(T_g)$ и $q^*(T_f)$ - удельные влажности насыщения при температуре поверхности почвы T_g и поверхности листьев T_f ; q_{af} - удельная влажность воздуха в межлиственном пространстве; r - относительная влажность воздуха на поверхности почвы; r_{ag} и r_a - аэродинамические сопротивления между поверхностью земли и поверхностью листьев и поверхностью листьев и атмосферой; r_s - устьичное сопротивление растительности, ρ_a – плотность воздуха, LAI – листовой индекс.

Влагоперенос в почве описывается уравнением диффузии влаги с учетом ее поглощения корнями растений: $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta)] - S(\theta, z)$, где θ - влажность почвы, $K(\theta)$ – коэффициент гидравлической проводимости, $D(\theta)$ – коэффициент диффузии почвенной влаги, $S(\theta, z)$ – интенсивность поглощения влаги корнями $S(\theta, z) = -K(\theta) \cdot [\psi_f - \psi(\theta)] \cdot b_f \cdot \rho(z)$. Здесь $\psi(\theta)$ – капиллярно-

сорбционный потенциал почвенной влаги, ψ_r и $\rho(z)$ – водный потенциал корневой системы и ее плотность; b_r – эмпирический коэффициент. Верхнее граничное условие определяется из уравнения водного баланса для приповерхностного слоя почвы, на нижней границе ее деятельного слоя поток влаги принимается равным гидравлической проводимости. Для расчета коэффициента диффузии почвенной влаги, коэффициента гидравлической проводимости почвы и потенциала почвенной влаги использовались два разных набора эмпирических формул, для которых результаты расчетов влажности почвы на всех горизонтах приводили к очень близким значениям. (Первый, рассчитанный на использование натуральных данных о максимальной гигроскопичности, полной влагоемкости, влажности завядания (в соответствии с [5]), представлен в наших предыдущих исследованиях [2]. Вторым предложен Клаппом и Хорнбергером [6]). Как и в работах [7, 8], температурный режим деятельного слоя почвы описывается уравнением теплопроводности с нижним граничным условием в виде потока тепла, расходуемого на нагревание нижележащих слоев почвы, пропорционального градиенту температур. При этом поток тепла в почву на глубине, где температура остается постоянной в течение всего сезона вегетации, принимается равным нулю. Потоки тепла, поступающего на покрытые растительностью участки и участки оголенной почвы, учитываются по-отдельности. Вертикальный поток тепла в почву, представляющий верхнее граничное условие для уравнения теплопроводности, является одним из членов уравнения теплового баланса для верхнего слоя голой почвы. Из последнего уравнения определяются значения T_g . Значения T_f находятся из уравнения теплового баланса для растительного покрова в пренебрежении его теплосодержанием. Входными переменными модели являются температура, влажность и давление воздуха, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация, значения которых определяются по данным стандартных сетевых метеорологических наблюдений. Начальные условия для уравнений влагопереноса и теплопроводности задаются на момент начала вегетации по измерениям профилей влажности и температуры почвы на агрометеостанциях, находящихся на водосборе. Описанная начально-краевая задача для этих уравнений решалась численно, расчетный шаг по времени составлял три часа или одни сутки.

Пространственная неоднородность подстилающей поверхности учитывалась в модели путем деления площади водосбора на несколько больших участков, каждый из которых прилегал к одной из агрометеостанций, данные метеонаблюдений на которой распространялись на весь этот участок, с последующим делением каждого из участков на более мелкие, однородные по типам почв, типам землепользования и видам растительности. Каждая из выделенных почв характеризовалась набором параметров, включавшим объемный вес, максимальную гигроскопичность, наименьшую полевую влагоемкость, пористость и коэффициент фильтрации. Неоднородность растительного покрова представлялась в модели минимальным устьичным сопротивлением, листовым индексом LAI, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений. Для определения аэродинамического сопротивления растительности использовались значения ее морфометрических характеристик. Значения суммарного испарения и других составляющих водного баланса для всего водосбора вычислялись как средневзвешенные по площади каждого элементарного участка с определенными метеоусловиями, типом почв и видом растительности.

При разработке версии модели SVAT, рассчитанной на использование спутниковой информации о характеристиках подстилающей поверхности, был осуществлен переход от описанной схематизации водосбора к регулярной сетке размером 3x3 пиксела ($\sim 7 \times 5 \text{ км}^2$), в узлах которой с помощью модели оценивались значения радиационной температуры подстилающей поверхности T_s , а по спутниковым данным определялись значения эффективной температуры поверхности $T_{s,eff}$. Этот переход производился с учетом значений площадей описанных элементарных участков в пределах каждого элемента сетки. Температура T_s рассчитывалась в модели по остаточному члену 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, вычислявшиеся, как и в [2], с учетом потерь длинноволнового излучения на многократное рассеяние по-

верхностью земли и листовой поверхностью в соответствии с [9]. Расчет величины R_a производился по ее эмпирической зависимости от температуры воздуха, давления водяного пара и облачности, выбранной в [2] по результатам сравнения T_s и $T_{s,eff}$.

Калибровка и верификация модели выполнялись по результатам сопоставления рассчитанных и фактических вертикальных профилей влажности и температуры почвы и значений температуры ее поверхности, а также вычисленных и измеренных значений радиационного баланса, влагозапасов метрового слоя почвы и суммарного испарения (при наличии последних). В качестве фактических использовались данные наблюдений на шести агрометеостанциях, находящихся на водосборе или вблизи его границ. Помимо этого производилось сравнение рассчитанных по модели значений температур T_f , T_g и T_s с их спутниковыми аналогами T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$. Для большинства сроков каждого из рассматривавшихся сезонов вегетации разности значений $T_s - T_{s,eff}$, $T_f - T_a$ и $T_g - T_{sg}$ не превышали значений погрешностей определения $T_{s,eff}$, T_a и T_{sg} по спутниковым данным.

Основные результаты

Для разработки и испытания методов анализа данных AVHRR был сформирован архив синхронных спутниковых и наземных наблюдений за вегетационные периоды 1999-2004 гг., который содержал результаты измерений радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-14, -16, -17 с разрешением $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе для территории, включавшей водосбор р.Сейм, и материалы синоптических наблюдений за температурой воздуха и поверхности почвы для шести агрометеостанций Курской и Воронежской областей (Курск, Нижнедевицк, Обоянь, Тим, Поныри и Каменная Степь). Оценки NDVI, E , B , T_a , T_g и $T_{s,eff}$ строились для фрагментов изображения размером 3×3 пиксела, соответствовавших ячейке сетки модели SVAT площадью $\approx 5 \times 7$ км². Детектирование облачности производилось т.н. многопороговым методом [10], причем выбирались только те случаи, когда в пределах рассматриваемых фрагментов находилось не менее двух "безоблачных" пикселей. Количество дней, полностью или частично безоблачных в течение сезона вегетации, для данного региона достаточно велико, поэтому массивы использованных спутниковых данных содержали несколько десятков изображений для каждого из сезонов. Точность определения T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ по спутниковым данным оценивалась путем сравнения с данными наблюдений на агрометеостанциях за сроки, наиболее близкие к моменту пролета спутника. Использовались следующие стандартные статистические характеристики погрешности: среднее смещение (смщ), среднее квадратическое отклонение (ско) и стандартное отклонение (сто) спутниковых оценок от данных наземных измерений ($сто^2 = ско^2 - смщ^2$). Примеры статистики ошибок определения T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} для упомянутых агрометеостанций для сезона вегетации 2004 г. представлены в таблице 1. Здесь также приведены соответствующие значения NDVI и B . Значения ϵ для этих станций и всех исследуемых сезонов заключены в пределах 0.982 - 0.985.

Для описанного метода оценки характеристик подстилающей поверхности по данным AVHRR установлено, что:

а) расчет коэффициентов регрессии в формулах для оценки T_a и T_g лучше проводить для относительно небольших временных периодов (порядка 3-4 недель) со схожими погодными условиями;

б) оценки T_a являются наиболее достоверными (значения ско не превышают $2,8^\circ\text{C}$); несколько ниже точность оценок $T_{s,eff}$ (значения ско заключены в диапазоне $2,4 - 3,6^\circ\text{C}$); наибольшие ошибки имеют спутниковые оценки T_{sg} (значения ско составляют $3,5-4,9^\circ\text{C}$);

в) самые большие расхождения между спутниковыми и наземными данными (особенно для $T_{s,eff}$ и T_g) отмечались в жаркий период лета (конец июня-июль), что, по-видимому, вызвано местным перегревом поверхности почвы на агрометеостанциях (измеренные локальные значения достигали $+ 60^\circ\text{C}$

и более), а также разницей до полутора часов между спутниковыми и наземными наблюдениями и пространственным усреднением спутниковых оценок в пределах нескольких пикселей;

г) минимальная изменчивость значений коэффициентов регрессии в зависимости от временного интервала, т.е. синоптических условий, отмечена для T_a , максимальная – для T_g .

Таблица 1. Спутниковые оценки характеристик подстилающей поверхности и статистика ошибок определения T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} для сезона вегетации 2004 г.

Агрометеостанция	N	NDVI	B	T_a			$T_{s,eff}$			T_{sg}		
				Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто
Курск	64	0,386	0,57	-0,96	2,41	2,21	-0,98	2,96	2,80	-0,73	4,51	4,45
Обоянь	61	0,349	0,50	-1,31	2,83	2,51	-1,42	3,64	3,35	-1,38	4,79	4,59
Поныри	51	0,343	0,49	0,44	2,53	2,50	0,63	3,38	3,32	0,41	4,91	4,89
Тим	55	0,358	0,52	0,90	2,39	2,21	0,77	2,40	2,28	0,91	3,46	3,34
Каменная Степь	51	0,324	0,45	1,19	2,53	2,23	1,30	3,02	2,73	1,50	3,98	3,69
Нижнедевицк	52	0,358	0,52	0,23	2,50	2,49	0,31	2,84	2,82	0,67	3,70	3,63
Среднее		0,353	0,51	0,08	2,53	2,36	0,10	3,04	2,88	0,23	4,23	4,10

Кроме того, с целью верификации и оценки качества полученных данных были сопоставлены оценки $T_{s,eff}$, построенные по информации MODIS и AVHRR для различных сроков периода вегетации 2003 г. (наиболее близкие друг к другу по месту и времени зондирования). Оказалось, что расхождения значений ско для этих оценок лежат в пределах 0.8 – 1.7°C, что подтверждает приемлемое качество зондирования радиометра MODIS. В результате произведенной работы сформирован набор оценок величин NDVI, E, $T_{s,eff}$ и LAI по данным MODIS, подготовленных для экспериментов по их усвоению в модели SVAT.

Вопрос использования в качестве параметров модели SVAT спутниковых оценок LAI и B при разработке версии модели, адаптированной к информации с ИСЗ, обусловлен существенным влиянием этих характеристик затенения поверхности на ход процессов формирования запасов влаги в почве, ее испарения и транспирации для покрытых растительностью участков суши и, как следствие, необходимостью получения интегральных, т.е. осредненных по площади, оценок данных величин. Задание по наземным данным временного хода LAI и его максимальных значений для разных культур производилось в работе с помощью построенных зависимостей LAI от высоты растений при использовании результатов фитометрических наблюдений на агрометеостанциях [11]. Полученные значения LAI могли корректироваться по результатам сравнения рассчитанных по модели температур T_f , T_g и T_s со спутниковыми оценками T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$. Контроль соответствия температур позволил сконструировать временной ход LAI для нескольких сельскохозяйственных культур при недостатке данных наземных наблюдений. Для оценки LAI по спутниковым данным использовались его эмпирические зависимости от индекса вегетации NDVI: LAI = NDVI·1.71 + 0.48 для травянистой растительности;

LAI = -2.5·ln(1.2·2·NDVI) для сельскохозяйственных культур [12, 13]. Спутниковые оценки LAI сравнивались со значениями, полученными по данным фитометрических наблюдений на агрометеостанциях водосбора. Сопоставление временного хода LAI, построенного по спутниковым и наземным данным, производилось для каждого из сезонов вегетации 1999-2004 гг. Пример такого сопоставления для агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г. представлен на рис. 1 а. Достоверность оценок LAI при этом определялась путем сравнения T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} с T_f , T_s и T_g . Временной ход оценок LAI по спутниковым данным отличался отсутствием скачкообразных изменений, характерных для

моментов скашивания растений, что может быть обусловлено генерализацией спутниковой информации даже в пределах пиксела. Расчет величины B в модели производился с помощью формулы: $B = 1 - \exp(-p \cdot LAI)$, где p – эмпирический коэффициент, значения которого подбирались по результатам сопоставления T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} с T_f , T_s и T_g при использовании значений LAI, определявшихся как по спутниковым, так и по наземным данным. По результатам численных экспериментов с моделью для всех рассматривавшихся сезонов вегетации наилучшие совпадения температур были достигнуты при $p = 0.40$ (при разбросе значений от 0.33 до 0.45 для отдельных сезонов и неизменных значениях всех остальных параметров). Отклонения значений B от среднего для разных сезонов могут быть связаны с различиями в жаркие сухие и холодные влажные годы количества зеленой массы, а следовательно и значений LAI. Отметим, что среднеклиматическое значение p принимается равным 0.45. Пример сопоставления значений B , определявшихся по спутниковым данным и рассчитывавшихся в модели при оценке LAI по данным наземных наблюдений на агрометеостанции Обоянь в течение сезона вегетации 2004 г., представлен на рис. 1.б.

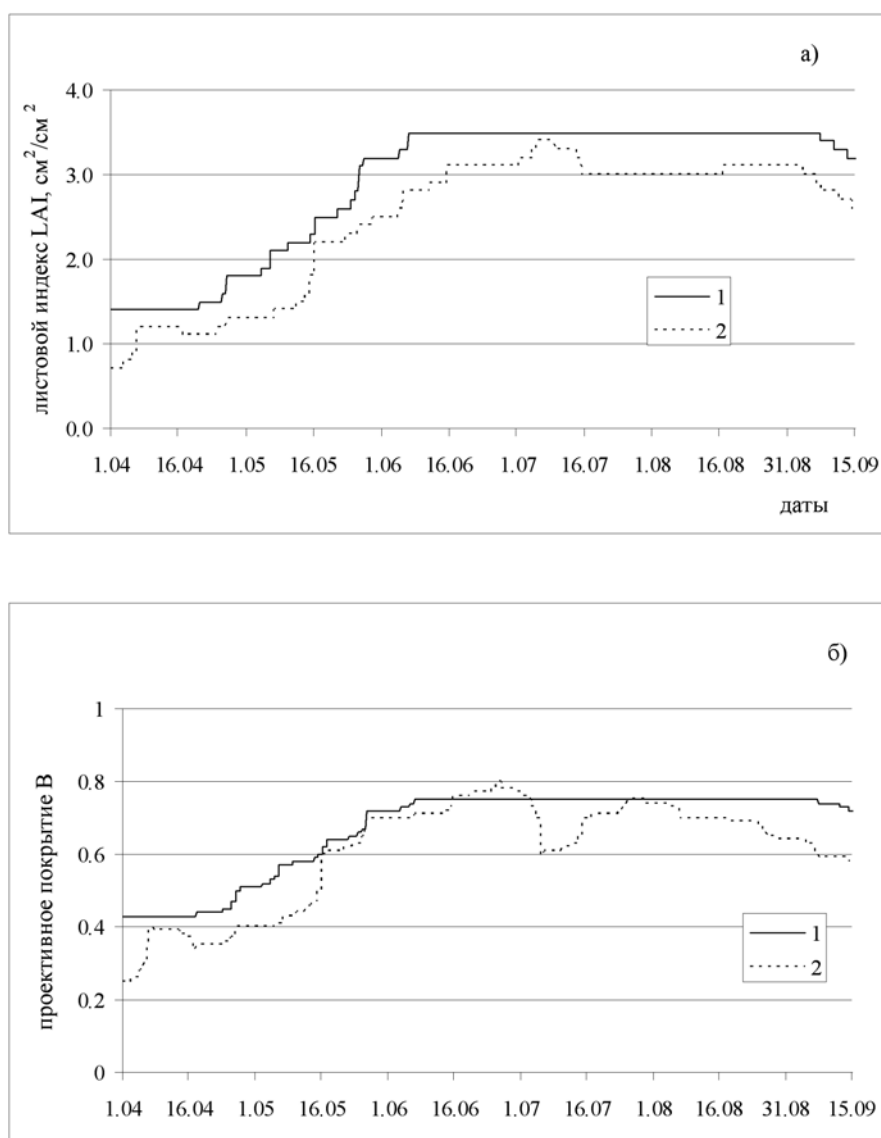


Рис. 1. Временной ход листового индекса LAI (а) и проективного покрытия B (б), определённый по данным AVHRR (1) и по данным наземных наблюдений (2) для участка с зерновыми культурами на агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г.

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 следующих вариантов расчетов по модели:

- 1) сезонный ход LAI для разных угодий задавался по результатам наземных наблюдений за сменой фенофаз и высотой растений. Значения B рассчитывались по приведенной выше формуле и заданным значениям LAI;
- 2) значения LAI определялись по спутниковым данным. Значения B рассчитывались по той же формуле с подстановкой спутниковых оценок LAI;
- 3) оценки LAI и B строились по спутниковым данным.

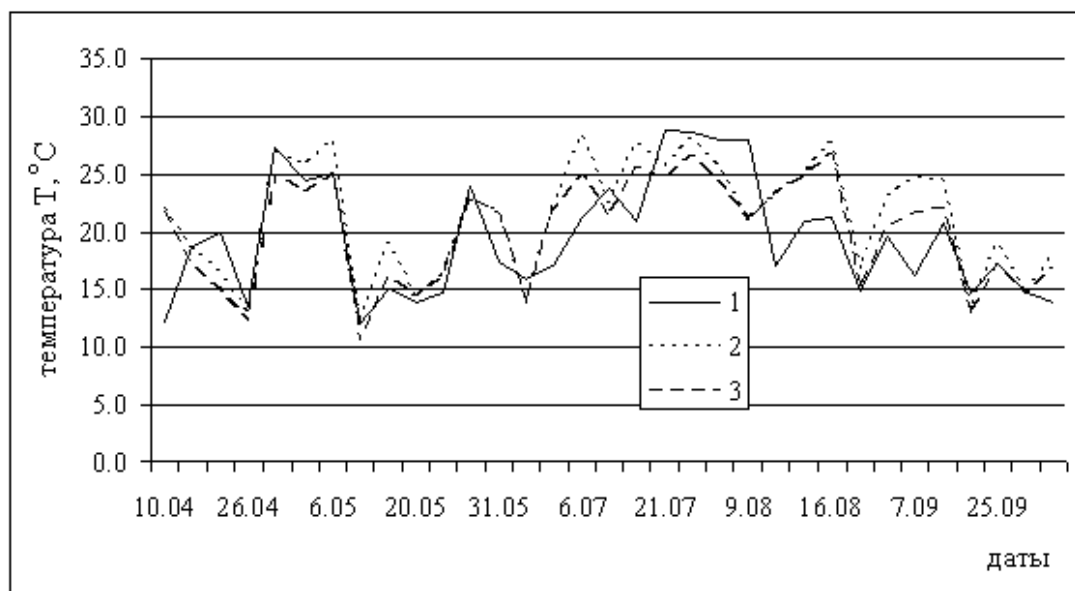


Рис. 2. Радиационная температура подстилающей поверхности, определённая по данным AVHRR, $T_{s,eff}$, (1) и вычисленная по модели, T_s , по спутниковым (2) и наземным (3) LAI и B для участка с зерновыми культурами на агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г.

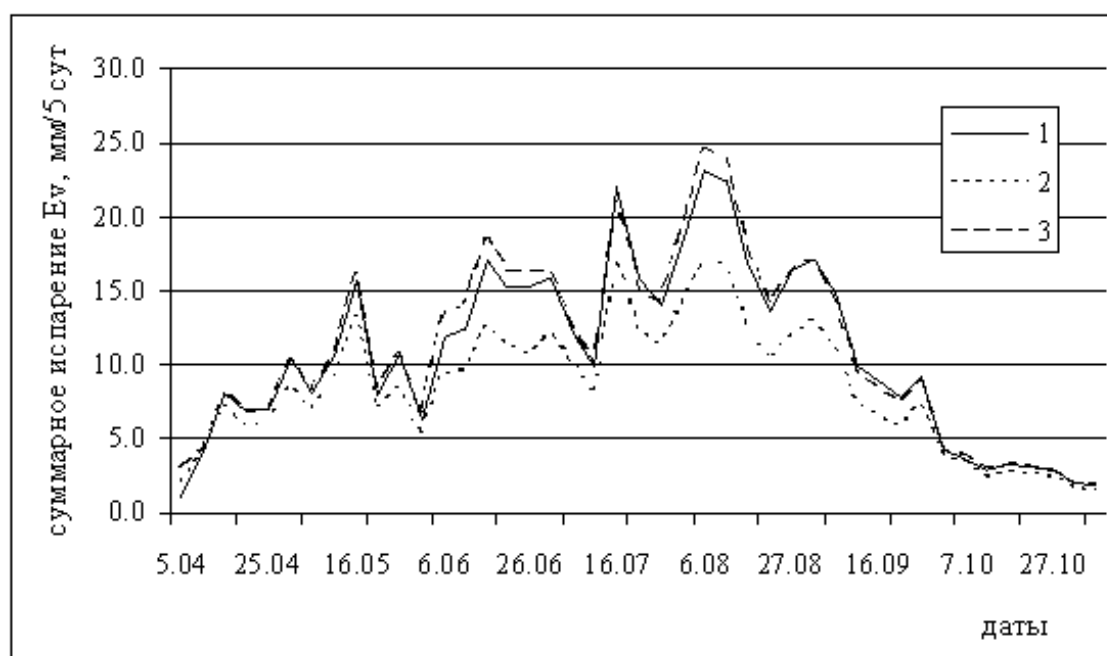


Рис. 3. Временной ход рассчитанного по модели суммарного испарения при оценках LAI и B по данным AVHRR для зерновых культур (1) и многолетних трав (2) и по наземным данным для зерновых (3) на агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г.

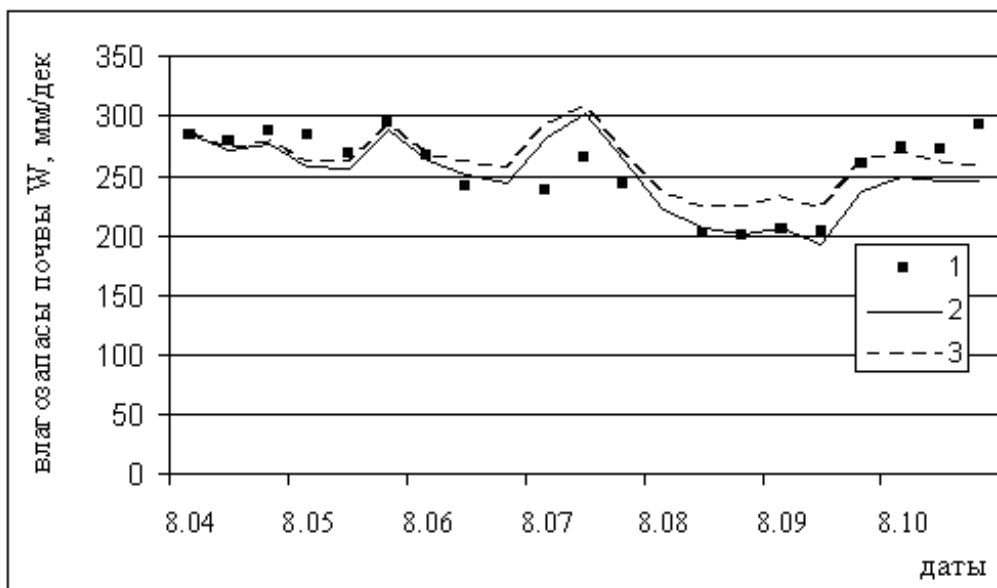


Рис. 4. Временной ход влагозапасов почвы, измеренных под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценках LAI и B по данным AVHRR для зерновых (2) и многолетних трав (3) на агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г.

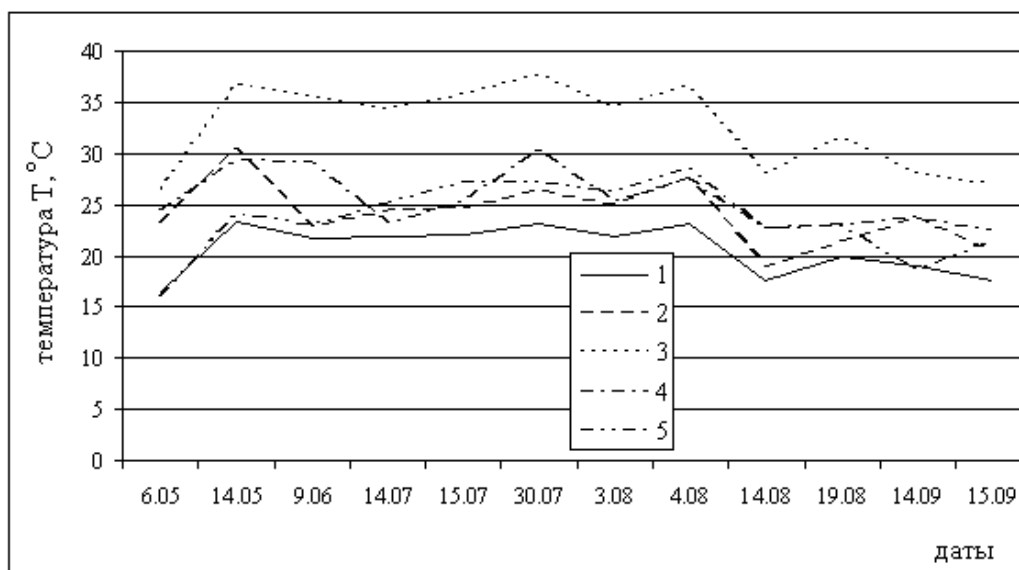


Рис. 5. Значения температур поверхности растительного покрова T_a (1), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$ (2), поверхности почвы T_{sg} (3), определенных по данным AVHRR/NOAA и аналогичной радиационной температуры $T_{s,eff}$ определенной по данным MODIS/Terra (4). (5) – наблюдаемая температура воздуха. Агрометеостанция Нижнедевицк, участок с многолетними травами, 2003 г.

Наименьшие расхождения спутниковых и модельных оценок температур были получены для T_a и T_f . Для всех вариантов расчетов практически для всех сроков измерений каждого из шести рассматривавшихся сезонов вегетации эти расхождения не превышали величины погрешности определения T_a по спутниковым данным. При этом значения T_a и T_f были близки значениям температуры воздуха, измеренной на агрометеостанциях. Разности значений $T_s - T_{s,eff}$ и $T_g - T_{sg}$ для

первых двух вариантов оценки LAI и В в подавляющем большинстве случаев также лежали в пределах значений погрешности спутниковых оценок $T_{s,eff}$ и T_{sg} за исключением случаев резкого подъема температур T_s и T_g при локальных местных перегревах поверхности иссушенной почвы и в периоды покосов на травянистых участках (фиксировавшиеся при определении LAI по данным наземных наблюдений по их заметным отклонениям от спутниковых оценок LAI). Для третьего варианта расчетов по модели указанные разности температур превышали значения данных погрешностей в большем числе случаев, чем в первом и втором вариантах, что может быть обусловлено различием моментов времени проведения наземных и спутниковых измерений и разной степенью генерализации полученных данных. Эти результаты подтверждаются оценками коэффициента корреляции рядов T_s и $T_{s,eff}$ для всех сезонов вегетации (0.75-0.85, 0.78-0.82 и 0.55-0.70, соответственно, для первого, второго и третьего вариантов расчета)(см. также [4]).

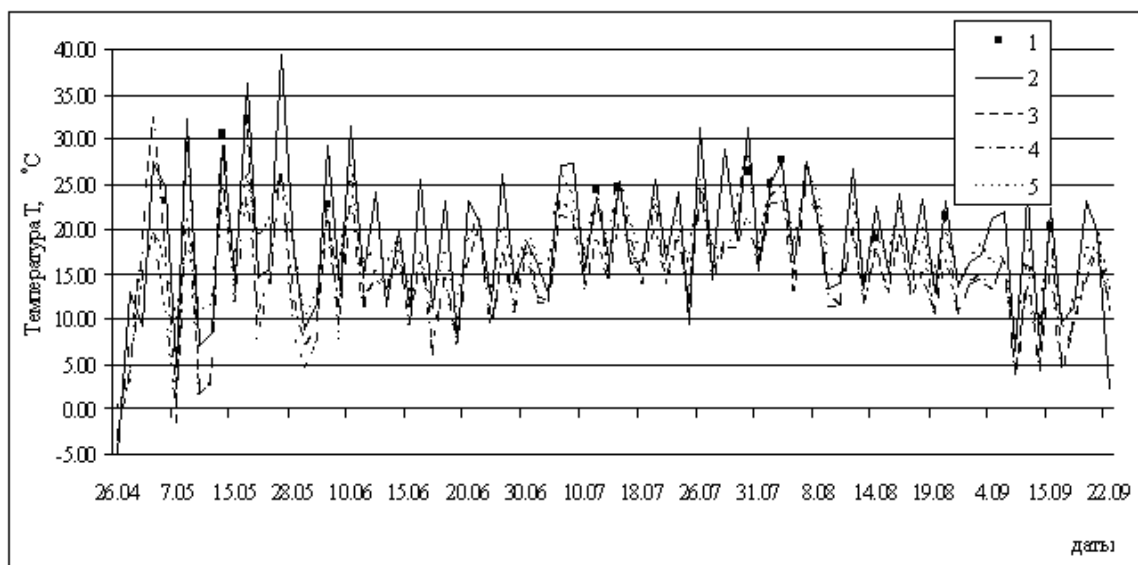


Рис. 6. Значения радиационной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, определенной по данным AVHRR/NOAA (1) и MODIS/Terra (2) и рассчитанной по модели при использовании оценок LAI и В, полученных по данным AVHRR для зерновых культур(3) и многолетних трав (4). (5) – наблюдаемая температура воздуха для травяного участка. Агрометеостанция Нижнедевицк, 2003 г.

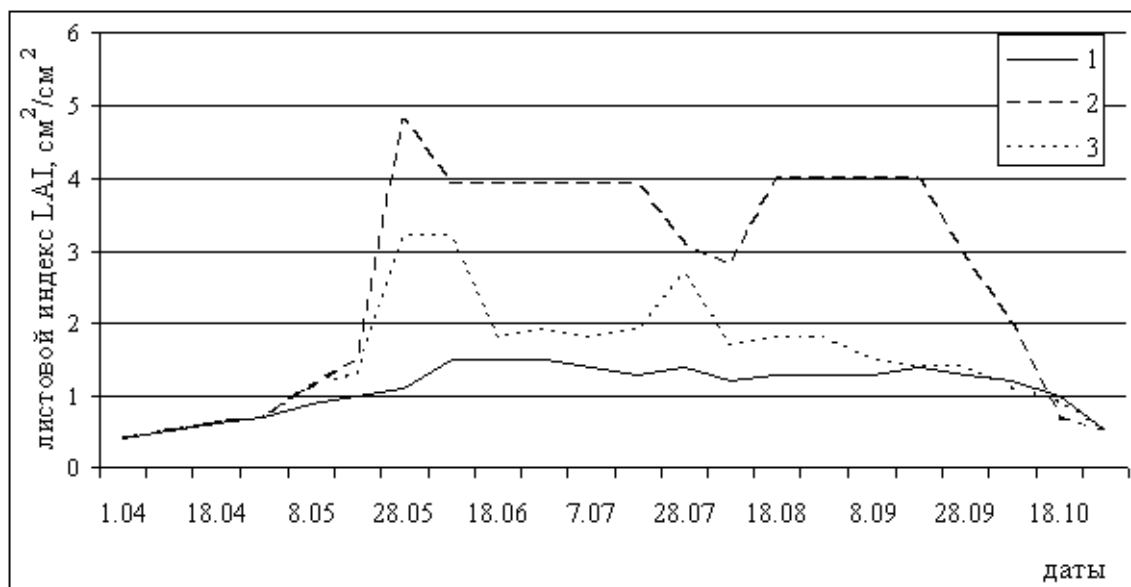


Рис. 7. Значения листового индекса LAI, определенного по данным AVHRR/NOAA для зерновых культур(1) и многолетних трав (3) и по данным MODIS/Terra (2). Агрометеостанция Нижнедевицк, 2003 г.

Пример сопоставления $T_{s,eff}$ и T_s при оценках LAI и В по спутниковым и наземным данным на разные даты сезона вегетации 2004 г. для агрометеостанции Обоянь представлен на рис.2.

Значения LAI и В, полученные при реализации всех трех вариантов оценки, использовались для расчетов с помощью модели SVAT составляющих водного баланса – суммарного испарения E_v , влагозапасов почвы, инфильтрации воды в почву, потока влаги из ее верхнего метрового слоя к лежащим ниже горизонтам. Расчеты проводились для каждой из агрометеостанций и для всего водосбора р.Сейм для сезонов вегетации 1999-2004 гг. Расхождения результатов расчетов E_v при всех вариантах задания LAI и В составили 2-3 мм за декаду. Такие величины не превышают стандартной ошибки оценки испарения, что может быть объяснено относительной близостью значений LAI, определяемых по спутниковым и по наземным данным, в течение всего сезона вегетации, за исключением периода покосов. На рис.3 представлен временной ход суммарного испарения, рассчитанного по модели с использованием спутниковых оценок LAI и В для зерновых культур и травянистых участков, а также их оценок по данным наземных наблюдений на агрометеостанции Обоянь для сезона вегетации 2004 г. Временной ход влагозапасов почвы, также рассчитывавшийся в трех вариантах для тех же сезонов вегетации, практически совпал с временным ходом их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис. 4).

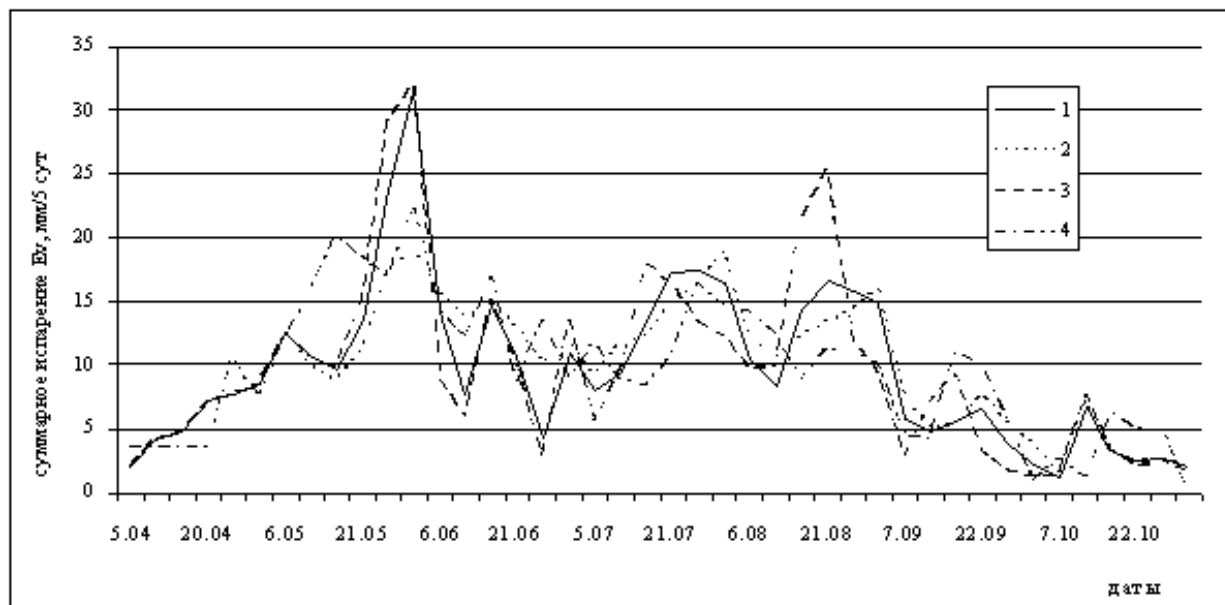


Рис. 8. Значения суммарного испарения E_v , рассчитанного по модели при оценках LAI по данным MODIS/Terra (1) и по данным AVHRR/NOAA для зерновых культур(2) и многолетних трав (3). 4 – измеренные значения E_v для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

Таким образом, результаты модельных экспериментов для шести сезонов вегетации позволяют сделать вывод о возможности использовать спутниковые оценки LAI и В, полученные по данным AVHRR/NOAA, в качестве параметров модели SVAT для расчетов с приемлемой точностью составляющих водного баланса и температур растительности и поверхности почвы, а также радиационной температуры подстилающей поверхности. При этом влияние размеров площади затенения почвы растительностью (характеризуемых параметром В) на величины названных температур не уступает влиянию временных изменений LAI.

Наряду с описанным выше в работе изучалась возможность использования в модели оценок температуры $T_{s,eff}$ и LAI, полученных по данным радиометра MODIS/Terra. Для разных сроков сезона вегетации 2003 г. были построены поля $T_{s,eff}$ и произведено сравнение значений $T_{s,eff}$ 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, и результатами расчетов по модели с использованием наземных и спутниковых оценок LAI и В. Значения $T_{s,eff}$ были сопоставлены также со значениями температуры воздуха, измеренной на агрометеостанциях. Результаты всех этих сопоставлений для агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г. представлены на рис. 5 и 6. Наилучшие совпадения были зафиксированы для значений $T_{s,eff}$, определенных по данным MODIS и AVHRR (рис. 5), а также по данным MODIS и модельным расчетам с использованием оценок LAI и В по данным AVHRR (рис. 6). В обоих случаях расхождения полученных оценок находились в пределах ошибки определения $T_{s,eff}$ по данным AVHRR. По данным MODIS были также построены поля значений LAI. Сравнение временного хода LAI (MODIS) для всего вегетационного периода с временными ходами LAI (AVHRR) для сельскохозяйственных культур и для травянистых растений, а также с аналогичным временным ходом, построенным по наземным данным, выявило то, что оценки LAI (MODIS) лежат между двумя оценками LAI (AVHRR) и близки к оценкам LAI по наземным данным для травянистых участков (рис. 7). Расхождения оценок LAI по данным AVHRR и MODIS вызваны, скорее всего, использованием разных эмпирических формул для их определения, а также процедурой осреднения данных MODIS. Оценки LAI (MODIS) использовались в модельных расчетах величин суммарного испарения E_v и других составляющих водного баланса. Сравнение временных ходов величин E_v для всего сезона вегетации, рассчитанных по модели при оценках LAI по данным AVHRR и MODIS показало практическое совпадение значений E_v , рассчитанных с использованием LAI (MODIS), с аналогичными значениями, рассчитанными с использованием LAI (AVHRR) для сельскохозяйственных культур - в первой половине сезона (примерно до середины июля) и для травянистых растений - во второй (рис. 8). Построенный также по данным наземных наблюдений на травянистых участках временной ход E_v оказался достаточно близок к рассчитанным.

В работе исследовались также возможность использования спутниковых оценок температур подстилающей поверхности в качестве переменных модели и в известной степени определяющее эту возможность влияние суточного хода значений параметров растительного покрова на точность определения температур растительности и поверхности почвы по спутниковым данным. Поскольку разница температур растительности за 2 часа в ряде случаев достигает 4-5 градусов, несовпадение времени спутниковой съемки (результаты обработки которой вводятся в модель) и срочных наблюдений на агрометеостанциях может приводить к значительным расхождениям спутниковых и модельных оценок температур, превышающим величину погрешности их определения по спутниковым данным. При близости этих моментов времени различия T_a и T_g , $T_{s,eff}$ и T_s лежат в пределах значений указанной погрешности. (Исключения могут составлять всплески значений температур, обусловленные локальными перегревами). Подобный вывод сделан нами по результатам численных экспериментов с моделью при использовании не согласованных по времени данных. Разброс значений температур и рассчитанных по этим температурам значений транспирации оказался весьма значительным. При согласовании моментов времени спутниковых и наземных наблюдений расхождения величин транспирации, рассчитанных при введении в модель спутниковых или модельных оценок температур, лежат в стандартных пределах. Подобные результаты позволяют получать оценки вертикальных потоков влаги при использовании в модели значений температур подстилающей поверхности, определенных по спутниковым данным (согласованным по времени), и дают дополнительное обоснование для предлагаемых методов расчета этих потоков с поверхности речных водосборов при недостатке данных наземных наблюдений.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны:

- методы тематической обработки данных измерений радиометра AVHRR для оценки температур поверхности растительного покрова T_a , поверхности почвы T_g , радиационной температуры $T_{s,eff}$ и излучательной способности ϵ подстилающей поверхности, вегетационного индекса NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью В;

- процедуры обработки полученных с использованием Интернет ресурсов данных радиометра MODIS для оценки $T_{s,eff}$, ϵ , NDVI;

- адаптированная к спутниковым оценкам названных величин версия физико-математической модели SVAT, предназначенной для расчета вертикальных потоков влаги и тепла, профилей влажности и температуры почвы, а также температур поверхности почвы и растительности для различных сроков в течение сезона вегетации. Эта работа включала выявление возможности замены данных наземных наблюдений при задании временного хода LAI и В, используемых в качестве параметров модели, а также температур T_a , T_g и $T_{s,eff}$ на спутниковые оценки этих величин, что подтверждено результатами сравнения значений спутниковых и модельных радиационных и термодинамических температур. Полученные небольшие расхождения спутниковых и модельных оценок этих температур, не превышавшие величин погрешности их определения по спутниковой информации, позволили использовать в модели SVAT результаты оценки температур, LAI и В по спутниковым данным для расчета суммарного испарения и других составляющих водного баланса речного водосбора.

Литература

1. Успенский А.Б. Об оценке температуры поверхности суши по данным спутниковых измерений уходящего ИК излучения в диапазоне 10,5-12,5 мкм // Метеорология и гидрология, 1992. №10. С. 19-27.
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. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas // Remote Sensing of Environment. V.57. 1996. P. 167-184.
4. 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.
5. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели // М.: Наука, 1983. 216 с.
6. Clupp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some hydraulic properties // Water Resources Research. V.14. № 4. 1978. P. 601-604.
7. Старцева З.П. Учет теплопереноса в почве в модели суммарного испарения // Метеорология и гидрология, 1990. № 11. С. 93-100.
8. 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 // Hydrological Sciences Journal, 1991. V.36. № 6. P. 631-643.
9. Taconet O., Bernard L., Vidal-Madjar D. Evapotranspiration over agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data // Journal of Climate and Applied Meteorology. V.25. № 3. 1986. P.284-307.
10. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Определение количества облачности по изображениям облачного покрова в видимом и инфракрасном диапазонах спектра с полярно-орбитальных ИСЗ // Метеорология и гидрология, 1998. № 9. С. 15-25.
11. 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.
12. 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.
13. Biftu G.F., Gan T.Y. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River basin, Alberta, using remotely sensed data // J. Hydrol., 2001. V.244. P. 137-156.