

Использование оценок температур подстилающей поверхности и характеристик растительности по спутниковой информации высокого разрешения при моделировании вертикального тепло- и влагообмена на речном водосборе

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

¹ *Институт водных проблем РАН*

E-mail: muzylev@aquas.laser.ru

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

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Разработаны и усовершенствованы методы и алгоритмы тематической обработки информации радиометра AVHRR/NOAA для оценки температуры T_g и излучательной способности E почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры $T_{s,eff}$, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B . С их помощью по данным AVHRR/3 (ИСЗ NOAA-18) получены оценки названных величин за разные сроки вегетационных периодов 2003-2006 гг. для части территории ЦЧО России, включающей водосбор р.Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км². Проанализирована статистика ошибок определения $T_{s,eff}$, T_a и T_g для различных выборок, построенная по результатам сравнения с данными наземных наблюдений.

С использованием специальной технологии и средств Интернета по данным радиометра MODIS (ИСЗ EOS/Terra и Aqua) получены оценки $T_{s,eff}$, E , NDVI, LAI для Курского региона за сезоны вегетации 2003-2005 гг.

Разработана версия модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), учитывающей неоднородность почвенного и растительного покровов и рассчитанной на введение в модель спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности. Подтверждена возможность использования в качестве параметров модели оценок LAI и B по спутниковым данным AVHRR и MODIS вместо их оценок по данным наземных наблюдений. Показано, что условием эффективного использования в модели SVAT оценок температуры подстилающей поверхности по данным AVHRR и MODIS является синхронность наземных и спутниковых измерений. С помощью модели SVAT для сезонов вегетации 2003-2006 гг. проведены расчеты суммарного испарения, потоков скрытого и явного тепла, влаго- и теплосодержания почвы и других составляющих водного и теплового балансов для различных вариантов оценки LAI и B по данным AVHRR и MODIS, а также по наземным данным. Для всех вариантов достигнута приемлемая точность оценки составляющих водного и теплового балансов.

Ключевые слова: тематическая обработка спутниковой информации, моделирование влаго- и теплопереноса, температуры почвы и растительности, влажность почвы, листовой индекс, проективное покрытие растительностью.

Введение

Большое внимание, уделяемое в настоящее время разработке физико-математических моделей вертикального влаго- и теплопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), обусловлено принципиальной возможностью использования результатов моделирования при решении широкого круга задач, связанных с оценками составляющих водного и теплового балансов в их динамике. Недостаточность или отсутствие данных измерений характеристик подстилающей

поверхности и метеохарактеристик, которые используются в таких моделях в качестве параметров и переменных, приводит к необходимости привлечения в качестве недостающей информации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это позволяет с помощью модели получать оценки потоков влаги и тепла с обширных территорий, не охваченных наземными измерениями.

Подобная постановка вопроса определила основные цели данной работы:

- получение оценок температуры поверхности почвы T_g и ее излучательной способности E , температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры $T_{s,eff}$, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA, а также определение значений T_g , E , NDVI, LAI по данным радиометра MODIS/EOS Terra и Aqua;
- разработку версии модели SVAT, способной усваивать перечисленные спутниковые данные (с учетом их пространственной неоднородности);
- проведение с помощью модели расчетов составляющих водного и теплового балансов и температур подстилающей поверхности.

Исследования проводились для участка территории ЦЧО России, включающего водосбор р. Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км², для сезонов вегетации 2003-2006 гг.

Методы тематической обработки и анализа спутниковых данных

Методы и алгоритмы тематической обработки данных AVHRR/NOAA подробно рассмотрены в [1-3], поэтому остановимся на выполненных в последнее время усовершенствованиях. Разработанная ранее методика детектирования облачности [1] была расширена за счет введения дополнительных процедур для оценки различных характеристик облачного покрова и типов осадков [4]. Выделение с помощью данной методики “безоблачных” пикселей (детектированных с близкой к 100 % вероятностью) привело к повышению точности результатов ДЗЗ, что подтверждено статистикой ошибок для рассматриваемых сезонов.

При совершенствовании методов тематической обработки данных AVHRR основное внимание было уделено тщательности формирования обучающих выборок пар наземных и спутниковых измерений. Также произведено уточнение параметров в регрессионных алгоритмах оценки T_a и T_g . Значения эффективной радиационной температуры поверхности $T_{s,eff}$ рассчитывались по формуле: $T_{s,eff} = B \cdot T_{sv} + (1-B) \cdot T_{sg}$, где T_{sv} и T_{sg} – радиационные температуры на верхней границе растительного покрова и почвы, при упрощающих предположениях $T_{sv} = T_a$, $T_{sg} = T_g$.

С помощью разработанной авторами технологии [5] и средств Интернета подготовлен архив данных дистанционного зондирования ($T_{s,eff}$, E , NDVI, LAI) по информации MODIS (ИСЗ EOS/Terra и Aqua) для Курского региона за различные сроки сезонов вегетации 2003-2005 гг. Оценки $T_{s,eff}$, E , NDVI и LAI в числе других дистанционных данных глобального покрытия регулярно производятся в Центре GSFC/NASA (США) и размещаются на веб-сайте LP DAAC. Для определения $T_{s,eff}$ и E применяется обобщенный метод “расщепленного окна прозрачности” [6,7]. Оценки NDVI строятся стандартным образом. Значения LAI вычисляются с помощью алгоритма [8]. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем их получают за временной период в 8 дней. При подготовке архива ДЗЗ с веб-сайта LP DAAC (NASA) загружаются два вида оценок $T_{s,eff}$: продукты (MOD11B1) на квазирегулярной сетке (разрешение ~ 4.8 км) и продукты (MOD11_L2) с разрешением ~ 1 км. Согласно результатам сопоставлений оценки $T_{s,eff}$ (MOD11B1) для большинства сроков более достоверны, чем оценки $T_{s,eff}$ (MOD11_L2).

Краткое описание модели SVAT

Модель вертикального тепло- и влагопереноса в системе “почва-растительность-атмосфера” (SVAT) [9, 10, 1, 2] предназначена для расчета испарения с голой почвы, транспирации

растительного покрова, профилей влажности и температуры почвы, влаго- и теплосодержания ее деятельного слоя, вертикальных потоков скрытого и явного тепла и других составляющих водного и теплового балансов, а также температур поверхности почвы T_g и растительности T_f , и радиационной температуры подстилающей поверхности T_s для любого интервала времени в течение сезона вегетации. Подстилающая поверхность представляется в модели как сочетание двух слоев – почвы и растительности, поэтому потоки влаги и тепла, поступающие на покрытые растительностью участки и участки голой почвы и исходящие с их поверхности, учитываются по отдельности. Это относится и к суммарному испарению, представляемому в виде суммы испарения с голой почвы E_g и транспирации растительности E_f ,

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

$$(LE_g \text{ и } LE_f) \text{ и явного } (H_g \text{ и } H_f) \text{ тепла: } H_g = \frac{\rho_a c_p (T_g - T_{af})}{r_{ag}} \quad H_f = \frac{\rho_a c_p (T_f - T_{af})}{r_{af}}$$

Здесь T_g и T_f – температуры поверхности почвы и листьев, соответственно; T_{af} – средняя температура воздуха в межлиственном пространстве; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; $q^*(T_g)$ и $q^*(T_f)$ – удельные влажности насыщения воздуха на поверхности почвы при температуре T_g и на листовой поверхности при температуре T_f ; q_{af} – удельная влажность воздуха в межлиственном пространстве; 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, ρ_a – плотность воздуха, L – удельная теплота парообразования.

Влагоперенос в почве описывается уравнением диффузии влаги при учете поглощения воды корнями растений с верхним граничным условием в виде уравнения водного баланса для поверхности почвы. На нижней границе деятельного слоя почвы задается поток влаги, равный гидравлической проводимости. Температурный режим рассматриваемого метрового слоя почвы описывается с помощью уравнения теплопроводности. Значения T_g определяются из уравнения теплового баланса для верхнего слоя голой почвы, а значения T_f – из уравнения теплового баланса для растительного покрова в пренебрежении его теплосодержанием. Температура T_s рассчитывается 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, а R_{lf} и R_{lg} – длинноволновые составляющие радиационного баланса для растительного покрова и оголенной почвы. Начальные условия для уравнений влагопереноса и теплопроводности задаются на момент начала вегетации по измерениям профилей влажности и температуры почвы на находящихся 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. Расчетные шаги по времени составляли три часа или одни сутки. Более подробное описание модели SVAT можно найти в [2, 8].

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. Каждая из выделенных почв характеризовалась такими параметрами, как объемный вес, максимальная гигроскопичность, наименьшая полевая влагоемкость, пористость и коэффициент фильтрации. Неоднородность растительного покрова представлялась в модели минимальным устьичным сопротивлением, листовым индексом LAI, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений. Величины суммарного испарения и других компонент водного баланса для всего водосбора вычислялись как средневзвешенные с учетом размеров площадей, занятых каждым видом растительности для каждого из типов почв.

При разработке версии модели SVAT, рассчитанной на использование спутниковой информации о характеристиках подстилающей поверхности, был осуществлен переход от

описанной схематизации водосбора к регулярной сетке с ячейкой размером 3x3 пиксела (~5x7 км²), в узлах которой по модели вычислялись значения T_f , T_g , T_s , а также E_g , E_f , H_g , H_f и других составляющих водного и теплового балансов, а по данным AVHRR – значения T_{sg} , T_a , $T_{s,eff}$, а также B и LAI . По данным радиометра MODIS строились оценки $T_{s,eff}$ и LAI . Переход к регулярной сетке производился с учетом значений площадей упомянутых элементарных участков в пределах каждой ячейки сетки.

Обсуждение результатов

Усовершенствование и модификация методов тематической обработки данных AVHRR/3 производились на материале сформированного архива синхронных спутниковых и наземных агрометеорологических данных для части Центрально-Черноземной области России, включающей водосбор р.Сейм, за сезоны вегетации 2003-2006 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 и данные наблюдений за температурой воздуха и поверхности почвы на агрометеостанциях, находящихся на водосборе и вблизи его границ. Оценки NDVI, E , B , T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ производились для фрагментов изображений размером 3x3 пиксела, соответствовавших ячейке вычислительной сетки модели. Погрешность дистанционного определения T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ оценивалась путем сравнения спутниковых значений температур с данными наблюдений на агрометеостанциях за сроки, наиболее близкие к моменту пролета спутника. Наиболее достоверными являются оценки T_a (значения СКО спутниковых оценок от наземных для сезона вегетации 2004 г. заключены в диапазоне 2.0-2.6°C), менее точно определяются $T_{s,eff}$ (значения СКО составляют 2.5-3.7°C), самые большие погрешности характерны для T_{sg} (значения СКО достигают 3.5-4.9°C). Значения $T_{s,eff}$ сопоставлялись также с ближайшими по времени и местоположению оценками этих же температур, полученными для конкретных сроков названных периодов вегетации по данным радиометра MODIS. Значения максимальной абсолютной разности оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR/3) лежат в диапазоне 2.0-3.0°C, а СКО оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышают 3.5°C.

При разработке процедур усвоения в модели SVAT спутниковых оценок характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик проводились: 1) исследование возможности замены значений LAI и B , определенных по данным наземных наблюдений, на спутниковые оценки этих величин; 2) расчеты суммарного испарения, влагосодержания почвы, вертикальных потоков скрытого и явного тепла для агрометеостанций, находящихся на водосборе, при различных вариантах задания LAI и B (по данным AVHRR и по наземным данным для сезонов вегетации 2003-2006 гг. и по данным MODIS для сезонов 2003-2005 гг.); 3) исследование возможностей использования спутниковых оценок температур подстилающей поверхности в качестве переменных модели; 4) разработка способов введения в модель спутниковых оценок температур подстилающей поверхности и листового индекса LAI при учете их пространственных распределений, а также проведение с помощью модели расчетов вертикальных потоков тепла и влаги для всего водосбора для сезонов вегетации 2004-2005 гг.

Задание временного хода LAI и его максимальных значений для разных культур по наземным данным производилось по материалам [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 данным AVHRR использовались эмпирические зависимости от индекса вегетации NDVI:

$LAI = NDVI \cdot 1.71 + 0.48$ для травянистой растительности [12]; $LAI = -2.5 \cdot \ln(1.2 - 2 \cdot NDVI)$ для сельскохозяйственных культур [13]. Здесь $NDVI = (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1)$, где A_1 , A_2 – значения альбедо, полученные по измерениям радиометра AVHRR/NOAA в 1-м и 2-м каналах.

Спутниковые оценки LAI сравнивались со значениями, полученными по данным фитометрических наблюдений на агрометеостанциях водосбора для каждого из сезонов вегетации 2003-2006 гг. Пример сопоставления временных ходов LAI на воднобалансовой станции Нижнедевицк, построенных по спутниковым и наземным данным для сезона вегетации 2004 г. представлен на рис.1. Достоверность оценок LAI проверялась также косвенно - путем сравнения T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} с T_f , T_s и T_g . Расхождения спутниковых и наземных оценок LAI, например, для зерновых культур в отдельные сезоны, могут быть обусловлены особенностями видового состава растительности вблизи конкретной станции в данном сезоне, а также несовершенством используемых эмпирических формул. Аналогичные временные ходы LAI для каждого из названных сезонов вегетации для всех агрометеостанций были построены по данным радиометра MODIS (рис.1). Расхождения оценок LAI по данным AVHRR и MODIS можно отнести на счет различия временных масштабов полученных оценок (мгновенных – с интервалом в три часа - у первых и осредненных за 8 суток у вторых), а также использования для построения оценок LAI (MODIS) нового регрессионного алгоритма.

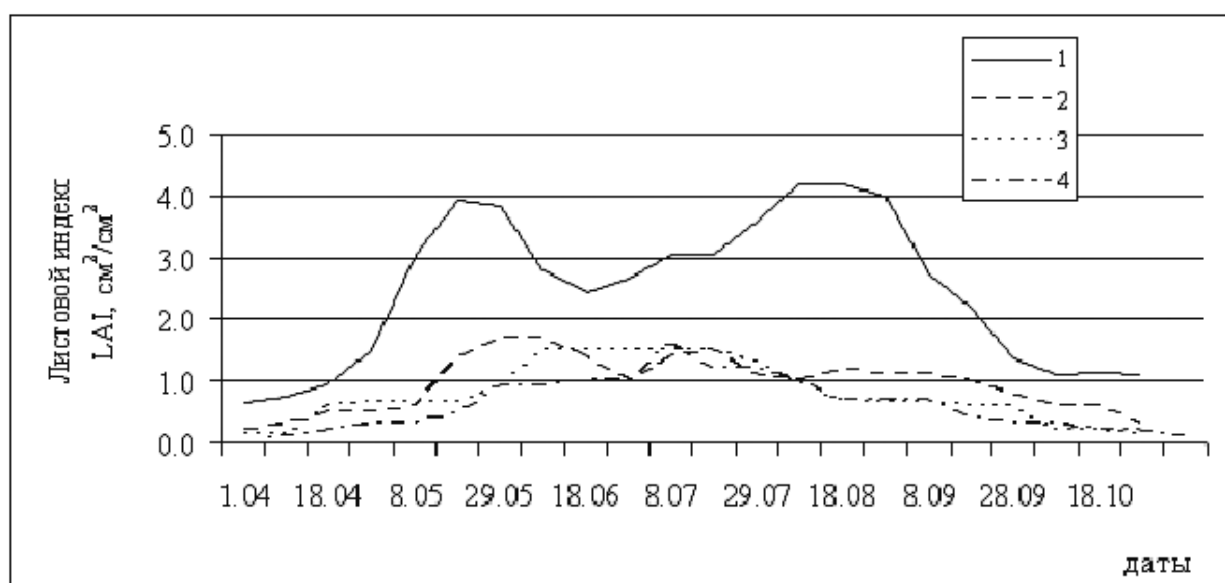


Рис.1. Временные ходы листового индекса LAI для сезона вегетации 2004 г., определённые по данным AVHRR/3 (1, 2), MODIS (4) и по данным наземных наблюдений (3) на воднобалансовой станции Нижнедевицк для зерновых (1) и травянистых (2, 3) культур

Оценка проективного покрытия V по данным AVHRR строилась с использованием эмпирических зависимостей из [14]. Для расчета этой величины по модели использовалась формула: $V = 1 - \exp(-p \cdot LAI)$. Здесь p – эмпирический коэффициент, значения которого подбирались по результатам сопоставления значений V , определенных по данным AVHRR/3 и вычисленных по этой формуле при построении оценок LAI по наземным и спутниковым данным, а также путем сравнения спутниковых и модельных оценок температур. Наилучшие совпадения температур были получены при $p = 0.40$ (см. также [5]). Сравнение величин T_a , $T_{s,eff}$ и T_{sg} с T_f , T_s и T_g для всех шести агрометеостанций, находящихся на водосборе и вблизи его границ, производилось при следующих вариантах расчетов по модели: 1) сезонный ход LAI для разных угодий задавался по данным наземных наблюдений за сменой фаз и высотой растений на агрометеостанциях, значения V вычислялись по приведенной формуле с использованием заданных значений LAI; 2) оценки LAI и V строились по данным AVHRR/3. Как и в [5], наименьшими для обоих вариантов расчетов оказались расхождения спутниковых и модельных оценок T_a и T_f , практически для всех сроков не превышавших погрешности определения T_a по данным AVHRR/3. При этом значения T_a и T_f оказались достаточно близки к значениям

температуры воздуха, измеренной на агрометеостанциях. Разности значений $T_s - T_{s,eff}$ и $T_g - T_{sg}$ для первого варианта оценки LAI и В превышали приведенные выше значения погрешностей определения $T_{s,eff}$ и T_{sg} по данным AVHRR для незначительного количества сроков, а для второго варианта – для несколько большего числа сроков, что, по-видимому, обусловлено разной степенью генерализации спутниковых и наземных данных и возможным несовпадением моментов времени их получения. Аналогичные результаты получены и для T_g . Также для сезонов вегетации 2003-2005 гг. произведено сравнение значений $T_{s,eff}$, полученных по данным радиометра MODIS, для отдельных сроков и их сезонного временного хода с аналогичными значениями и временным ходом, построенными по данным AVHRR, с результатами расчетов по модели при использовании наземных и спутниковых оценок LAI и В, а также 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 (рис.2). В обоих случаях расхождения полученных оценок находились в пределах погрешности определения $T_{s,eff}$ по данным AVHRR.

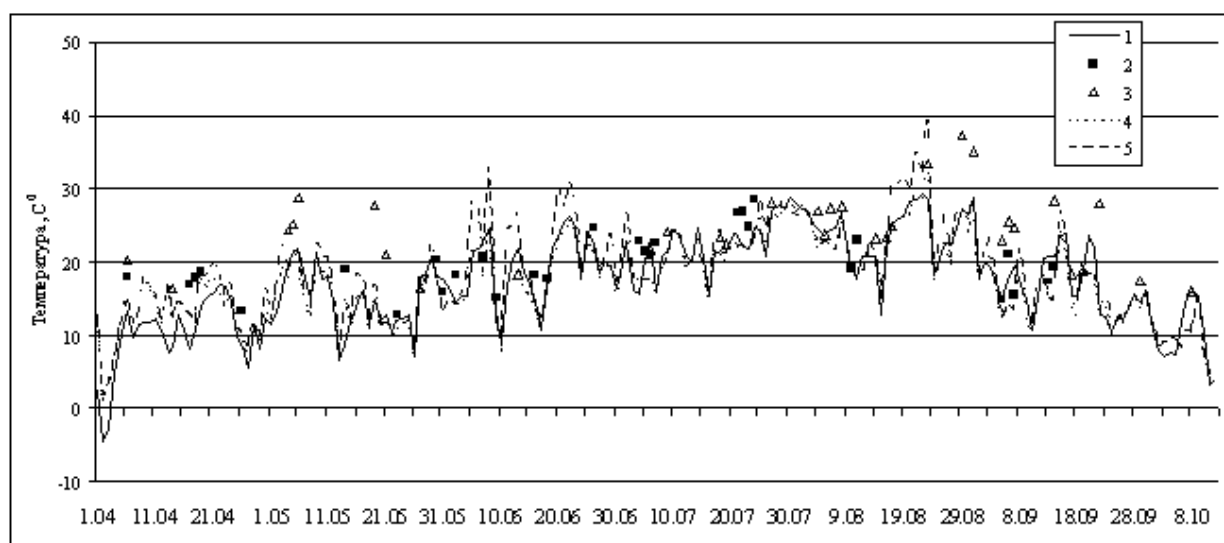


Рис.2. Временной ход температуры воздуха, T_a , над участком с многолетними травами (1), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности, $T_{s,eff}$, определённой по данным AVHRR/3 (2) и MODIS (3), и вычисленной по модели, T_s , при использовании оценок LAI по данным AVHRR/3 для зерновых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

С помощью разработанной версии модели 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 H тепла, теплосодержание почвы. Расчеты проводились для каждой из агрометеостанций и для всего водосбора р.Сейм для сезонов вегетации 2003-2006 гг. Точность оценок E_v и W проверялась путем сравнения вычисленных и измеренных значений этих величин, а при отсутствии измерений E_v – по результатам сопоставления его значений, рассчитанных для всех возможных вариантов оценки LAI и В. Для всех этих вариантов различия значений E_v не превышали нескольких мм за декаду (рис. 3а, б). Такая погрешность лежит в пределах стандартной ошибки оценки испарения (~ 20 %). Временной ход влагозапасов почвы W , рассчитанный для всех вариантов задания LAI и В по спутниковым и наземным данным, также оказался весьма близок временному ходу их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис. 4). Аналогичные результаты получены и при оценках потоков скрытого LE и явного H тепла, косвенная проверка адекватности которых 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. Оценки LAI по данным радиометра MODIS также использовались в расчетах с помощью модели величин E_v , W , LE , H и других составляющих водного и теплового балансов. 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, причем рассчитанный временной ход E_v оказался достаточно близок к построенному по данным наземных наблюдений на травянистых участках (рис. 3а, б). Численные эксперименты с моделью показали также, что различия значений E_v , рассчитанных с использованием LAI (AVHRR) и LAI (MODIS), с аналогичными значениями, рассчитанными при оценке LAI по наземным данным, уменьшаются при увеличении величины потенциала завядания. Временной ход величин W для всего сезона вегетации при оценках LAI по данным MODIS практически совпал с аналогичными временными ходами, рассчитанными при оценках LAI по данным AVHRR и наземным данным для многолетних трав, и оказался близок временному ходу измеренных значений W (рис. 4).

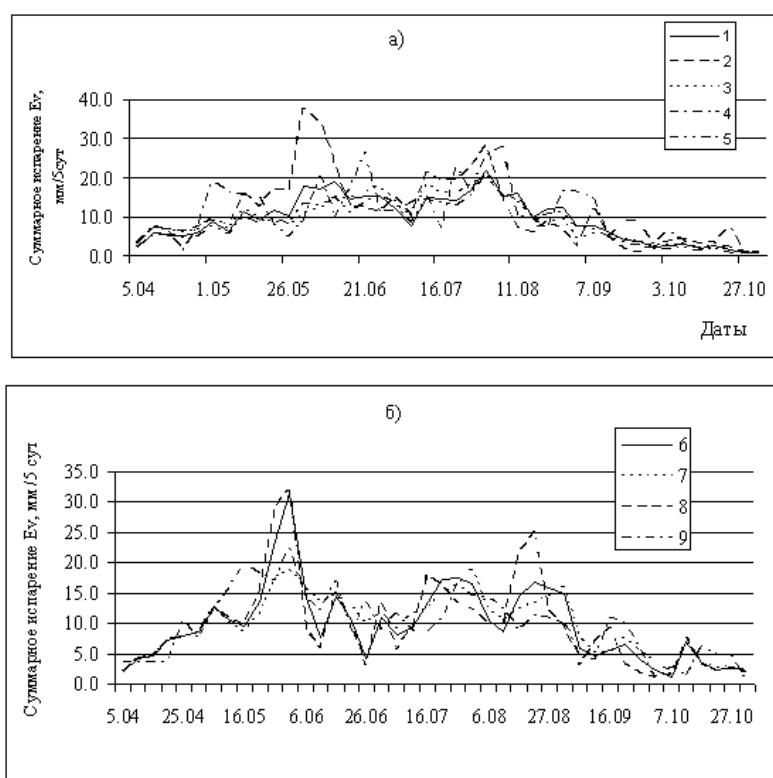


Рис. 3. Значения суммарного испарения E_v для сезонов вегетации 2004 (а) и 2003 (б) гг., рассчитанного по модели при оценках LAI по данным AVHRR/3 для зерновых культур (1, 7) и многолетних трав (2, 8), по данным наземных измерений для многолетних трав (3), по данным MODIS (5, 6). 4 и 9 – измеренные значения E_v для участка с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк

Таким образом, представленные результаты показывают возможность использования оценок LAI и B по данным радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua для расчетов с приемлемой точностью составляющих водного и теплового балансов.

Исследована возможность введения в модель температуры подстилающей поверхности, определенной по данным AVHRR/3 или MODIS, в качестве переменной. В результате численных экспериментов с моделью установлено, что при согласовании моментов времени спутниковых и наземных наблюдений расхождения оценок температур по данным AVHRR/3 и MODIS с результатами расчетов по модели лежат в пределах СКО оценки температур по данным AVHRR/3; при этом отклонения рассчитанных значений суммарного испарения и влагозапасов почвы от измеренных на агрометеостанциях не превышают стандартной погрешности их оценки. Таким образом, оценки температур

подстилающей поверхности по данным радиометров AVHRR/3 и MODIS могут быть использованы при определенных условиях в модельных расчетах вертикальных потоков тепла и влаги с поверхности речных водосборов.

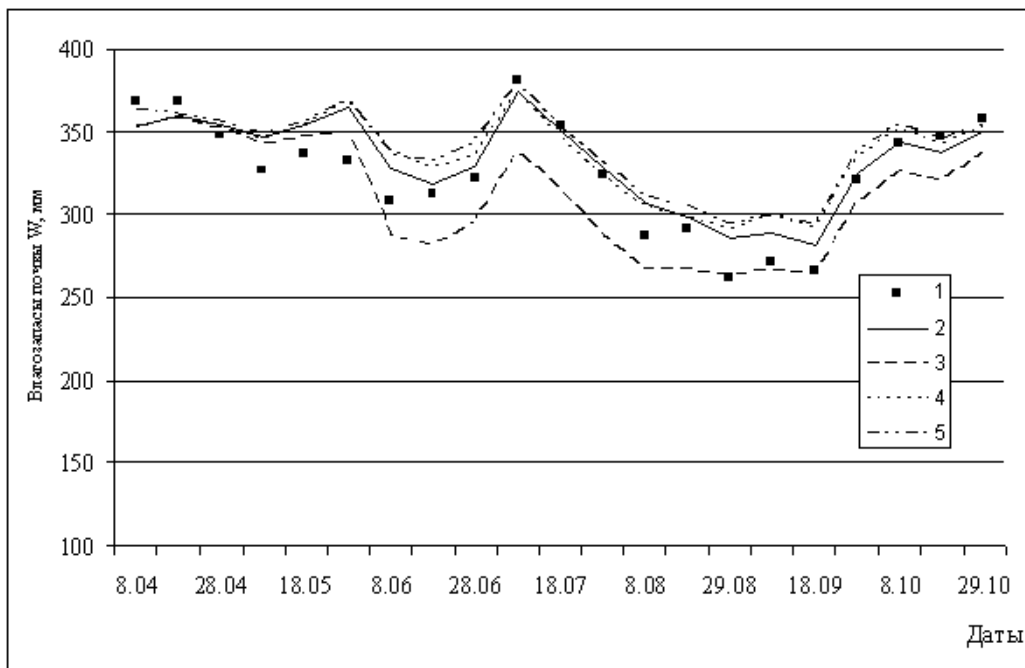


Рис.4. Временной ход влагозапасов почвы, измеренных (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/3 для многолетних трав (2) и зерновых культур (3), по данным MODIS (5) и по данным наземных измерений для многолетних трав (4) на воднобалансовой станции Нижнедевицк для сезона вегетации 2004 г.

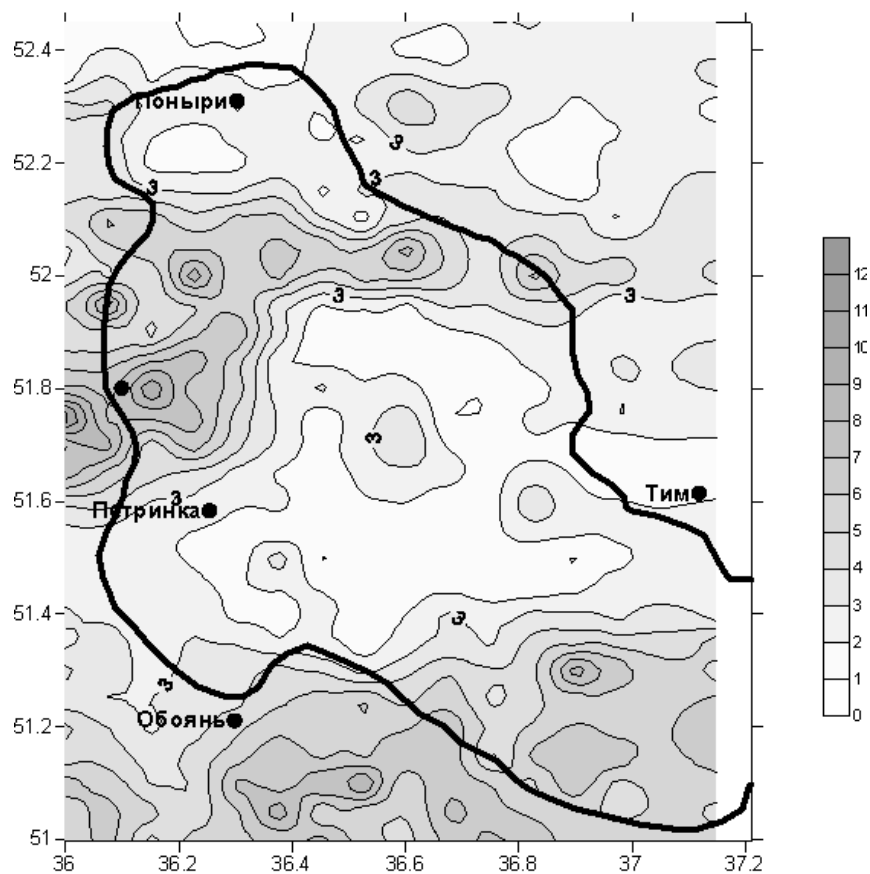


Рис.5. Распределение листового индекса LAI, определенного по данным AVHRR/3, по площади водосбора р.Сейм. 23 августа 2005 г., 15 ч. местного времени

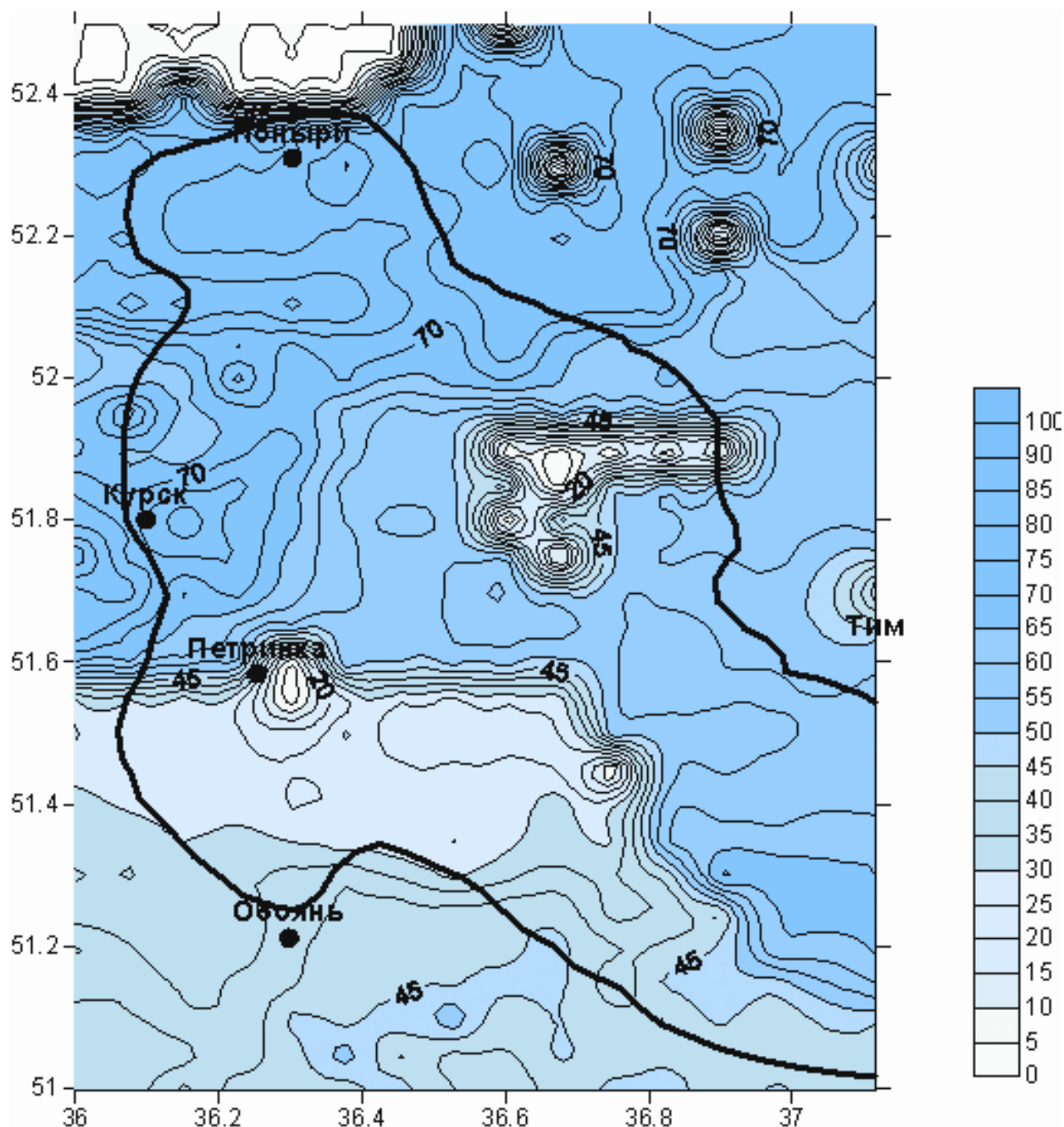


Рис.6. Распределение по площади водосбора р.Сейм величин суммарного испарения, рассчитанного по модели при использовании спутниковых оценок LAI и T_o для каждого узла вычислительной сетки

В настоящей работе предложена также новая версия модели SVAT, предназначенная для использования спутниковых данных, в которой полученные по этим данным оценки LAI и температуры подстилающей поверхности вводились в модель в каждом элементе вычислительной сетки размером 3x3 пиксела. При наличии регулярных спутниковых данных, соответствующих срочным данным стандартных сетевых метеорологических наблюдений, объем необходимой для модели наземной входной информации можно сильно сократить. В качестве примера на рис.5 для территории, включающей водосбор р.Сейм, представлено полученное по данным AVHRR/3 распределение LAI на одну из дат сезона вегетации 2005 г. Подобные распределения получены и для температуры подстилающей поверхности. Для тех сроков, когда спутниковая информация для данной территории отсутствует, в модель вводятся значения рассматриваемых характеристик, определенные для агрометеостанций. С помощью последней версии модели при использовании спутниковых

(AVHRR/3) оценок LAI и T_a в каждом узле вычислительной сетки рассчитывались суммарное испарение E_v , влагосодержание почвы W , потоки скрытого и явного тепла и другие составляющие водного и теплового балансов для сезонов вегетации 2004-2005 гг. В качестве примера на рис.6 представлено распределение по площади водосбора величин суммарного испарения.

Заключение

К основным результатам настоящей работы относятся:

1. Усовершенствованные методы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA для оценки характеристик подстилающей поверхности.

2. Адаптированная к спутниковым данным версия физико-математической модели SVAT. При разработке способов усвоения в модели спутниковых данных выявлены возможности замены данных наземных наблюдений при задании временного хода LAI и W , а также температур поверхности на спутниковые оценки этих величин. Подобный подход может использоваться для расчета составляющих водного и теплового балансов речного водосбора, слабо освещенного данными наземных наблюдений.

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. *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.

3. *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.

4. *Волкова Е.В.* Оценки параметров облачного покрова по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA регионального покрытия в светлое время суток в автоматическом режиме // *Сборник тезисов Шестой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*. Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г. М, Издательство ИКИ РАН, 2008. С.121.

5. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Определение характеристик подстилающей поверхности по данным радиометров AVHRR и MODIS и их использование в модели вертикального тепло- и влагопереноса для речного водосбора // *Сборник научных статей - материалов Юбилейной открытой Всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*. Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г. М., Изд-во ООО "Азбука-2000", 2008. Т.1. С.142-154.

6. *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.

7. *Wan Z.* MODIS Land Surface Temperature Products User's Guide.// ICESSE, Univ. of California, Santa Barbara. March 2006. 35 p.

8. *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. Geoph. Res.* 1998. V.103: P.32227-32275.

9. *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.

10. Kuchment L.S., Muzylev E.L., Startseva Z.P. The effect of land surface heterogeneities on the hydrological cycle // *Theor. and Appl. Climatol.* 1996. V.55. № 1-4. P.185-192.
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 // *Journal of Hydrology*, 2001. V.244. P.137-156.
14. 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.

Using land surface temperature and vegetation characteristic estimations by high resolution satellite data for modeling vertical water and heat transfer on river basin

E.L. Muzylev¹, A.B. Uspensky², Z.P. Startseva¹, E.V. Volkova², A.V. Kukharsky²

¹*Water Problem Institute of Russian Academy of Science, Moscow*

²*Scientific and Research Center of Space Hydrometeorology Planeta of RosHydromet, Moscow*

The technologies (methods and algorithms) of AVHRR/NOAA data thematic processing have been refined, providing the retrieval of soil temperature T_{sg} and emissivity E , surface-air temperature (at a level of vegetation cover) T_a , effective radiative temperature $T_{s,eff}$ (weighted linear combination of T_a and T_{sg}), as well as the derivation of leaf area index LAI. The archive of synchronous satellite measurements of AVHRR/3 NOAA-18, remote sounding data, and in-situ hydrometeorological observations has been compiled for the central region of Russia including the Seim River basin for 2003-2006 vegetation seasons. On the base of special technology and Internet resources the archive has been enlarged comprising remote sounding products (T_{sg} , E , NDVI, LAI) derived from MODIS (EOS/Terra and Aqua) data for the same region and vegetation seasons. The error statistics of $T_{s,eff}$, T_a and T_{sg} derivation has been investigated for various samples, using comparison with in-situ measurements. Good coincidence of these estimates has been revealed.

The model of vertical heat and water transfer for the "soil-vegetation-atmosphere" system (SVAT) has been updated and modified to account for heterogeneities of soil, vegetation cover and meteorological characteristics as well as to facilitate the pixel-to-pixel assimilation of above remote sounding products. In frame of these studies: 1) the values of some model parameters have been specified and the model verification has been performed; 2) the ability is confirmed to assimilate in the SVAT model satellite-derived estimates LAI and B (AVHRR- and MODIS-based) instead of their ground-based estimates; 3) the opportunity has been shown of using satellite-derived land surface temperature (AVHRR- and MODIS-based) as the SVAT model variable if the time matching of satellite and ground-based observations takes place. The calculations of evapotranspiration, latent and sensible heat fluxes, soil water and heat contents and other water and heat balance components have been carried out with help of the SVAT model for different scenarios of LAI and B estimating (from AVHRR/3, MODIS, and ground-based data) during seasons of vegetation 2003-2006. The acceptable accuracy levels of water and heat balance components assessment have been achieved under all scenarios of LAI and B specification.

Keywords: satellite data thematic processing, water and heat transfer modeling, soil and vegetation temperatures, soil moisture, leaf area index, vegetation cover fraction.