

# Использование данных дистанционного зондирования при моделировании вертикальных потоков влаги с речных водосборов

Е.Л. Музылев<sup>1</sup>, А.Б. Успенский<sup>2</sup>, З.П. Старцева<sup>1</sup>, Е.В. Волкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт водных проблем РАН,  
119991 Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 3  
E-mail: muzylev@aquas.laser.ru*

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

Представлено описание двух методов тематической обработки данных радиометра AVHRR/NOAA для определения при безоблачной атмосфере эффективной радиационной температуры и излучательной способности подстилающей поверхности, температур голой почвы и воздуха на границе растительности с атмосферой, нормализованного индекса вегетации, листового индекса и проективного покрытия растительностью. По результатам сравнения точности определения названных температур для дальнейшего применения выбран один из этих методов. Полученные по спутниковым данным оценки перечисленных характеристик использованы для валидации разработанной модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT) и вычислений с ее помощью суммарного испарения, влагозапасов почвы и других составляющих водного баланса. Подтверждены возможности расчета этих величин при использовании в качестве параметров модели спутниковых оценок LAI и В. Выявлены возможности агрегации параметров растительности для установления наибольшего соответствия их спутниковых и наземных значений. Исследовано влияние суточного хода значений параметров растительного покрова на спутниковые оценки температуры растительности и поверхности почвы.

## Введение

Одним из основных способов оценки вертикальных потоков влаги с поверхности речных водосборов в настоящее время является моделирование процессов вертикального влаго- и теплопереноса с учетом пространственных неоднородностей характеристик водосбора. Актуальность создания моделей этих процессов для системы "почва-растительность-атмосфера" (моделей SVAT) определяется принципиальной возможностью использования их результатов при решении широкого круга задач: оценки потоков влаги и тепла для ячейки модели общей циркуляции атмосферы; исследования углеродного обмена растительности с воздухом и почвой; оценки влияния антропогенного воздействия (вырубки лесов, распашки, обводнения и осушения территорий и т.п.) на составляющие водного и теплового балансов рассматриваемых участков суши. Привлечение спутниковой информации (например, результатов измерений радиометра AVHRR ИСЗ NOAA) для оценки характеристик подстилающей поверхности повышает достоверность модельных расчетов потоков влаги и тепла с поверхности водосбора, особенно при недостатке или отсутствии материалов наземных наблюдений. Анализ данных AVHRR позволяет строить оценки термодинамической и радиационной температур подстилающей поверхности, ее излучательной способности и альбедо, температуры воздуха у поверхности растительного покрова, а также характеристик растительности (индекса вегетации, листового индекса, проективного покрытия) и производить регулярное картирование их полей. Для использования в модели получаемых при обработке данных AVHRR оценок названных характеристик необходимо определять их точность, а также производить согласование пространственных и временных масштабов результатов спутниковых и наземных измерений. Эффективность такого согласования обеспечивается детальностью описания характеристик почв и растительности на водосборе, а также выбором размеров пиксела.

Данный подход обусловил цели настоящей работы: 1) получение по измерениям радиометра AVHRR/NOAA при отсутствии облачности оценок упомянутых характеристик подстилающей поверхности; 2) создание способов усвоения этих характеристик в разработанной модели SVAT как для ее валидации,

так и для проведения расчетов суммарного испарения, влагосодержания почвы и других составляющих водного баланса. Исследования проводились на примере находящегося в лесостепной зоне водосбора р.Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км<sup>2</sup> для сезонов вегетации 1997, 1999-2004 гг.

### Метод анализа спутниковых данных

Методы тематической обработки данных AVHRR для определения температур и других характеристик подстилающей поверхности при отсутствии облачности учитывают атмосферное ослабление излучения вследствие его поглощения водяным паром, аэрозолем и другими газами, отличие излучательной способности  $E$  от единицы и её зависимость от длины волны, а также пространственную неоднородность и временную изменчивость полей температур и  $E$  [1]. Первый этап этой обработки – выделение безоблачных фрагментов на изображениях AVHRR с помощью пороговых алгоритмов классификации [2]; пороговые тесты применялись к данным во всех пяти каналах радиометра AVHRR и к их линейным комбинациям. Подстилающая поверхность рассматривалась как совокупность поверхностей двух типов – растительного покрова и оголенной почвы. По данным AVHRR производились оценки температуры поверхности почвы  $T_g$  и воздуха у поверхности растительного покрова  $T_a$ , а также эффективная радиационная температура.

$T_{s,eff} = B \cdot T_{sv} + (1-B) \cdot T_{sg}$ , где  $T_{sv}$  и  $T_{sg}$  – радиационные температуры на верхней границе растительного покрова и почвы,  $B$  – проективное покрытие зондируемой площади растительностью (в долях от единицы). Значения  $T_a$  определялись по уравнению линейной регрессии, а значения  $T_g$  – с помощью алгоритма метода "расщепленного окна прозрачности" (РОП):  $T = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T4 - T5) + C3 \cdot (T4 - T5)^2 + C4 \cdot (E4 + E5) / 2 + C5 \cdot (E4 - E5) + C6$ , где  $T4$ ,  $T5$ ,  $E4$ ,  $E5$  – радиационные температуры и излучательные способности, измеренные в каналах 4 и 5 AVHRR, соответственно. Значение  $B$  для каждого пиксела вычислялось по формуле [3]  $B = (I - I_g) / (I_v - I_g)$ , 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. При этом  $I_v$  и  $I_g$  рассматривались как максимальное и минимальное значения NDVI в пределах всего изображения (пиксели, относящиеся к водной поверхности и закрытые облаками исключались). Оценка  $E$  производилась с помощью эмпирического соотношения [3].

$E = E_v \cdot B + E_g \cdot (1-B) + 0.06 \cdot B \cdot (1-B)$ , где  $E_v$ ,  $E_g$  – значения  $E$  для растительности и почвы из [4]. Определение значений  $E4$  и  $E5$ , а также уточнение оценки  $E$  производилось с использованием априорной модели EOS/MODIS. При оценке  $T_{s,eff}$  использовались упрощения:  $T_{sv} = T_a$ ,  $T_{sg} = T_g$ .

Достоверность спутниковых оценок  $T_a$ ,  $T_g$  и  $T_{s,eff}$  зависит от ряда особенностей описанного метода: 1) приближенного выполнения гипотезы  $T_a = T_{sv}$  (по разным литературным данным различия могут достигать 2°C); 2) достоверности оценки  $B$ , определяющейся точностью оценок  $I_g$  и  $I_v$ , различных для конкретных сроков и значений покрытости растительностью (при малой покрытости точность оценки величин  $I_g$  заметно ухудшается); 3) построения регрессионной оценки  $T_a$  на основе совмещения усредненных по пикселу результатов спутниковых и точечных наземных измерений при проведении последних на не покрытых растительностью участках поверхности. Уточнение оценки  $T_{s,eff}$  возможно либо путем более точного определения значений  $B$ , либо при задании  $T_{s,eff}$  без использования величины  $B$ . Последний вариант реализуется, если определять температуру воздуха вблизи земной поверхности  $T_{a,eff}$  на основе линейной связи между спутниковыми оценками NDVI и  $T_g$  вида:  $T_g = c_1 \cdot (NDVI) + c_2$ , где  $c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты регрессии [5, 6]. Существование функциональной связи между  $T_g$  и NDVI легко объяснимо: с ростом NDVI температура поверхности  $T_g$  должна убывать, поскольку пиксели без растительности или с малыми значениями NDVI должны быть теплее, нежели покрытые растительностью. На подобных качественных соображениях основана формула для дистанционного определения  $T_{a,eff}$  [5]:  $T_{a,eff} = c_1 \cdot (NDVI_{veg}) + c_2$ , которая следует из формулы для оценки  $T_g$  при  $NDVI = NDVI_{veg}$  – индексе вегетации для пиксела, полностью покрытого растительностью. Величина  $NDVI_{veg}$  зависит от типа растительности. Как и в [6], в наших расчетах использовано фиксированное значение  $NDVI_{veg} = 0.7$ . Таким

образом, к числу формальных преимуществ второго (модифицированного) метода относятся: 1) построение регрессионной связи между  $T_g$  и NDVI для спутниковых оценок, полученных с одинаковым усреднением (для одного пиксела или для блока пикселов); 2) отказ от использования в явном виде оценки  $V$ , достоверность которой не всегда можно обеспечить; 3) возможность подбора значений  $NDVI_{veg}$  в формуле для  $T_{a,eff}$  по результатам сопоставления  $T_{a,eff}$  с  $T_a$ . Однако проведенные в настоящей работе на материалах архива совмещенных спутниковых и наземных данных для вегетационных периодов 1999 - 2002 гг. численные эксперименты по построению оценки  $T_{a,eff}$  модифицированным методом не выявили статистически значимого выигрыша в точности определения  $T_{a,eff}$  по сравнению с первым (не модифицированным) методом оценки  $T_a$  и  $T_{s,eff}$  (подробнее см. раздел "Результаты исследований").

### Краткое описание модели SVAT

Модель SVAT [7-9] предназначена для расчета суммарного испарения, а также распределений влажности и температуры почвы по глубине для любого интервала времени в течение сезона вегетации. Она позволяет оценивать испарение с голой почвы, транспирацию, перемещение влаги в корнеобитаемой зоне, определять температуру поверхности почвы  $T_g$  и растительного покрова  $T_f$ . Подстилающая поверхность представляется в модели как совокупность двух слоев – почвы и растительности, поэтому потоки тепла, поступающего на покрытые растительностью участки и участки голой почвы и исходящего с их поверхности, учитываются по-отдельности. Суммарное испарение также представляется в виде суммы двух потоков - испарения с голой почвы  $E_g$  и транспирации растительности:  $E_g = \rho_a \cdot \gamma \cdot (q^*(T_g) - q_{af}) / \gamma_{ag}$ ,  $E_f = \rho_a \cdot (q^*(T_f) - q_{af}) \cdot LAI / (\gamma_a + \gamma_s)$ , 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;  $\gamma$  - относительная влажность воздуха на поверхности почвы;  $\gamma_{ag}$  и  $\gamma_a$  - аэродинамические сопротивления между поверхностью земли и поверхностью листьев и поверхностью листьев и атмосферой; соответственно,  $\gamma_s$  - устьичное сопротивление растительности,  $\rho_a$  – плотность воздуха.

Для описания влагопереноса в почве используется уравнение диффузии влаги с учетом поглощения воды корнями растений. Температурный режим деятельного слоя почвы воспроизводится с помощью уравнения теплопроводности. Поток тепла в почву, представляющий верхнее граничное условие для этого уравнения, является одним из членов уравнения теплового баланса для верхнего слоя голой почвы. Из последнего уравнения определяются и значения  $T_g$ . Значения  $T_f$  находятся из уравнения теплового баланса для растительного покрова в пренебрежении его теплосодержанием. Численное решение начально-краевой задачи для уравнений влагопереноса и теплопроводности позволяет рассчитывать вертикальные распределения влажности и температуры почвы для каждого временного шага. Расчетный шаг по времени – три часа или сутки. Начальные условия для названных уравнений задаются на момент начала вегетации по измерениям профилей влажности и температуры почвы на агрометеостанциях, находящихся на водосборе. Входными переменными модели SVAT являются температура, влажность и давление воздуха, осадки, суммарная радиация, скорость ветра, облачность, значения которых определяются по данным стандартных сетевых наблюдений.

Радиационная температура  $T_s$  (модельный аналог  $T_{s,eff}$ ) рассчитывалась по остаточному члену уравнения для длинноволновой части радиационного баланса.

$\sigma T_s^4 = R_a - R_{lf} - R_{lg}$ , где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $R_a$  - противозлучение атмосферы,  $R_{lf}$  и  $R_{lg}$  - длинноволновые составляющие радиационного баланса для растительного покрова и оголенной почвы, вычислявшиеся в соответствии с [10] при учете потерь длинноволнового излучения на многократное рассеяние поверхностью земли и листовой поверхностью. Расчет величины  $R_a$  производился по ее эмпирической зависимости от температуры воздуха, давления водяного пара и облачности, выбранной в [9] по результатам сравнения  $T_s$  и  $T_{s,eff}$ .

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 набором параметров, включавшим объемный вес, максимальную гигроскопичность, наименьшую полевую влагемкость, пористость и коэффициент фильтрации. Неоднородность растительного покрова представлялась в модели минимальным устьичным сопротивлением, листовым индексом LAI, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений. Последняя величина использовалась для определения аэродинамического сопротивления растительности. Величины суммарного испарения и других компонент водного баланса для всего водосбора вычислялись как средневзвешенные по площади каждого элементарного участка.

Калибровка и верификация модели производились по результатам сравнения вычисленных и измеренных значений суммарного испарения, а также рассчитанных и фактических вертикальных профилей влажности почвы и значений температуры ее поверхности. Для сопоставлений использовались данные наблюдений на шести агрометеостанциях, находящихся на водосборе или вблизи его границ, кроме того, сравнивались величины  $T_{s,eff}$  и  $T_s$ , определенные по данным AVHRR и рассчитанные по модели.

### Результаты исследований

Для создания методов тематической обработки спутниковых данных использован сформированный архив синхронных спутниковых и наземных наблюдений за вегетационные периоды 1997, 1999-2004 гг., который содержал результаты измерений радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-12, -14, -16 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 находящихся на водосборе и вблизи его границ агрометеостанций. Оценки  $T_a$ ,  $T_{sg}$ ,  $T_{s,eff}$ , NDVI, E и В строились для фрагментов изображения размером 3x3 пиксела, соответствовавших ячейке сетки модели SVAT площадью  $\approx 5 \times 7$  км<sup>2</sup>. Детектирование облачности производилось пороговым методом [2]. Рассматривались только те случаи, когда количество безоблачных пикселов в пределах выбранных фрагментов составляло не менее двух.

Для оценки точности определения по информации AVHRR величин  $T_a$ ,  $T_{sg}$  и  $T_{s,eff}$  использовалась выборка данных ближайших по времени пространственно совмещенных спутниковых и наземных измерений. Анализ статистики ошибок по отдельным станциям и с усреднением по всем станциям, для различных временных промежутков каждого сезона вегетации и для всех сезонов в целом показал, что величины среднеквадратичных погрешностей определения  $T_a$ ,  $T_g$  и  $T_{s,eff}$  находятся в пределах 1.7-2.4, 3.5-5.0 и 2.5-3.7°C, соответственно. Самые большие расхождения между наземными и спутниковыми данными (особенно для  $T_g$ ) отмечались в жаркий период лета (конец июня - июль), что по-видимому вызвано существенным (до + 60°C) локальным перегревом поверхности почвы, разницей до полутора часов между моментами спутниковых и наземных наблюдений и генерализацией (пространственным усреднением в пределах нескольких пикселов) спутниковых оценок.

При исследовании возможностей тематической обработки спутниковых данных с помощью модифицированного метода рассматривались различные варианты уравнений регрессии. Наибольшая точность оценок  $T_a$ ,  $T_{sg}$  и  $T_{s,eff}$ , практически совпадавшая с точностью оценки этих величин не модифицированным методом, была достигнута при использовании комбинаций из трех предикторов:  $T_4$ ,  $T_4-T_5$  и NDVI ( $T_4$  и  $T_5$  - радиационные температуры в 4-м и 5-м каналах радиометра AVHRR), причем увеличение количества предикторов не повышало точности дистанционных оценок. Сравнение значений  $T_a$ ,  $T_{sg}$  и  $T_{s,eff}$ , полученных по данным AVHRR с помощью обоих методов, соответственно со значениями температуры поверхностей листьев  $T_f$  и почвы  $T_g$ , а также радиационной температуры  $T_s$ , рассчитанными по модели SVAT, показало, что временной ход величин  $T_a$ ,  $T_{sg}$  и  $T_{s,eff}$ , определенных модифицированным методом, по количеству локальных максимумов и минимумов и характеру их чередования существенно отличается от временного хода этих величин, определенных не модифицированным методом, а также от временного хода рассчитанных по модели  $T_f$ ,  $T_g$  и  $T_s$ . Поэтому в работе использовались спутниковые оценки  $T_a$ ,  $T_{sg}$  и  $T_{s,eff}$ , полученные не модифицированным методом.

При разработке версии модели SVAT, адаптированной к спутниковой информации, исследовалась возможность использования в качестве ее параметров полученных по данным AVHRR оценок LAI и проективного покрытия В. Такой подход обусловлен существенным влиянием этих величин на процессы формирования вертикальных потоков влаги и тепла с покрытых растительностью территорий, что приводит к необходимости получения их интегральных (осредненных по площади) значений. Оценки LAI по спутниковым данным производились с помощью эмпирических зависимостей его от индекса вегетации NDVI [11, 12]:  $LAI = NDVI \cdot 1.71 + 0.48$  для травянистой растительности;  $LAI = -2.5 \cdot \ln(1.2 - 2 \cdot NDVI)$  для сельскохозяйственных культур. Пример построения временного хода LAI по спутниковым данным и по данным наземных наблюдений на воднобалансовом участке агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г. представлен на рис. 1. Различия спутниковых и наземных значений LAI для разных сроков наблюдений здесь могут быть обусловлены генерализацией спутниковой информации, проявляющейся даже в пределах пиксела. Высокая чувствительность величин  $T_s$  и суммарного испарения  $E_v$  к изменениям LAI (увеличение температур на  $5^\circ$  и более и уменьшение  $E_v$  на 15–17 мм за декаду после покоев) [9] и возможность коррекции значений LAI по результатам сравнения  $T_a$ ,  $T_{s,eff}$  и  $T_{sg}$  с  $T_f$ ,  $T_s$  и  $T_g$  позволили задать временной ход LAI для ряда сельскохозяйственных культур при отсутствии данных фитометрических наблюдений. Расчет величины В в модели производился с помощью формулы:  $B = 1 - \exp(-k \cdot LAI)$ , где  $k$  – 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, определенных как по спутниковым, так и по наземным данным. Серии численных экспериментов проводились для следующих вариантов оценки LAI и В: 1) значения LAI определялись по наземным данным и использовались для оценки значений В по приведенной формуле; 2) значения LAI определялись по спутниковым данным и также подставлялись в эту формулу; 3) LAI и В определялись по спутниковым данным. По результатам модельных экспериментов для всех рассматривавшихся сезонов вегетации наилучшие совпадения температур были зафиксированы при  $k = 0.40$  (при разбросе значений от 0.33 до 0.45 для отдельных сезонов). Такие отклонения значений В 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. Пример построения временного хода величины В по тем же, что и на рис.1, спутниковым и наземным данным представлен на рис.2.

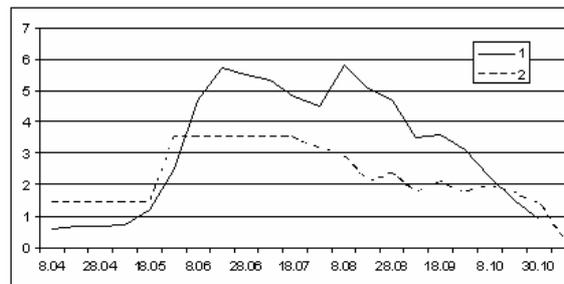


Рис. 1. Временной ход LAI для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк, определённый по спутниковым данным (1) и по данным наземных наблюдений (2) для сезона вегетации 2003 г.

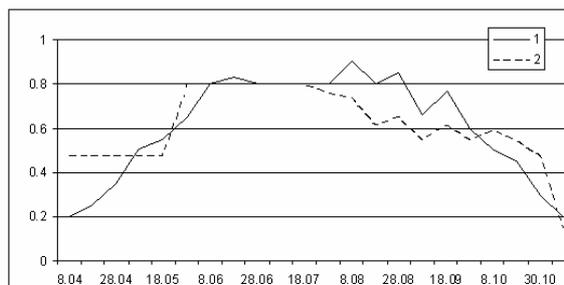


Рис. 2. Временной ход проективного покрытия В для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк, определённый по спутниковым данным (1) и по данным наземных наблюдений (2) для сезона вегетации 2003 г.

Результаты численных экспериментов показали, что наименьшие расхождения спутниковых и модельных оценок температур получаются для  $T_a$  и  $T_f$ . Практически для всех сроков измерений за все рассматривавшиеся сезоны вегетации и всех трех вариантов расчетов эти расхождения лежат в пределах погрешности определения  $T_a$  по спутниковым данным (рис.3). При этом значения  $T_a$  и  $T_f$  близки к значениям температуры воздуха, измеренной на агрометеостанциях. Разности значений  $T_s - T_{s,eff}$  и  $T_g - T_{sg}$  для первого и второго вариантов оценки LAI и В в подавляющем большинстве случаев также не превышали приведенных выше величин погрешности определения  $T_{s,eff}$  и  $T_{sg}$  по спутниковым данным (рис.4). Исключения составили всплески значений  $T_s$  в периоды покосов на травяных участках (при определении LAI по данным наземных наблюдений и их различии со спутниковыми оценками LAI) и в дни, когда отмечались местные перегревы поверхности почвы (до  $+60^\circ\text{C}$  и выше) при ее иссушении. Аналогичные результаты получены и для  $T_g$ . Для третьего варианта расчетов различия  $T_{s,eff}$  и  $T_s$ ,  $T_{sg}$  и  $T_g$  превышали значения погрешностей спутниковых оценок  $T_{s,eff}$  и  $T_{sg}$  в большем числе случаев, чем в первом и втором вариантах (рис.4), что по-видимому обусловлено разной степенью генерализации спутниковых и наземных данных и возможным несовпадением непосредственного момента времени их получения. Представленные результаты подтверждаются оценками коэффициента корреляции рядов  $T_{s,eff}$  и  $T_s$  для всех рассматривавшихся сезонов вегетации (0.75-0.85 для первого варианта, 0.78-0.82 для второго и 0.55-0.70 для третьего).

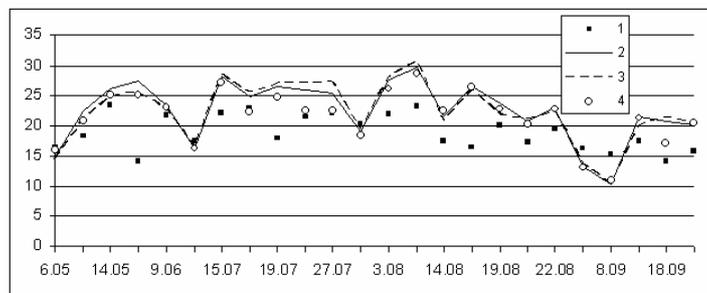


Рис. 3. Температура поверхности листьев, определённая по спутниковым данным,  $T_w$  (1) и вычисленная по модели,  $T_f$ , при использовании спутниковых оценок LAI и В (2), оценок LAI и В, построенных по данным наземных наблюдений за сменой фенофаз (3) на участке с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г. (4) – измеренная температура воздуха

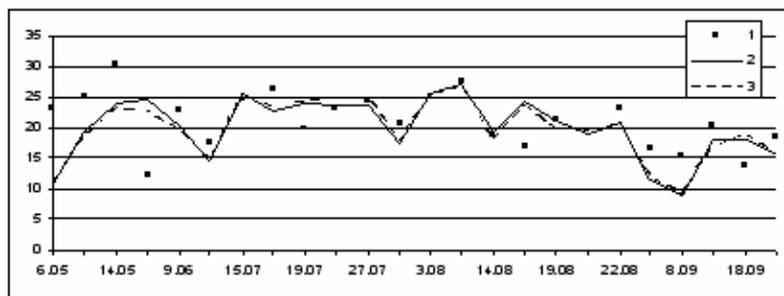


Рис. 4. Радиационная температура подстилающей поверхности, определённая по спутниковым данным,  $T_{s,eff}$  (1) и вычисленная по модели,  $T_s$ , по спутниковым (2) и наземным (3) LAI и В для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

Полученные при всех трех вариантах оценки значения LAI и В использовались в модели SVAT для расчетов суммарного испарения  $E_v$ , влагосодержания почвы, инфильтрации воды в почву, потока влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие слои. Эти расчеты для сезонов вегетации 1997, 1999-2004 гг. проводились для каждой из шести агрометеостанций и для всего водосбора р.Сейм. Различия значений  $E_v$  для всех вариантов расчета LAI и В не превышали 2-3 мм за декаду, что лежит в пределах стандартной

ошибки оценки испарения (рис.5). Временной ход влагозапасов почвы, также рассчитанный в трех вариантах, практически совпал с временным ходом их значений, измеренных на агрометеостанциях (рис.6). Таким образом, на основании расчетов для семи сезонов вегетации подтверждена возможность прямого введения в модель SVAT определенных по спутниковым данным значений листового индекса LAI и проективного покрытия В при сохранении достигнутой при задании LAI и В по наземным данным точности оценок и составляющих водного баланса, и температур растительности и поверхности почвы, и радиационной температуры подстилающей поверхности.

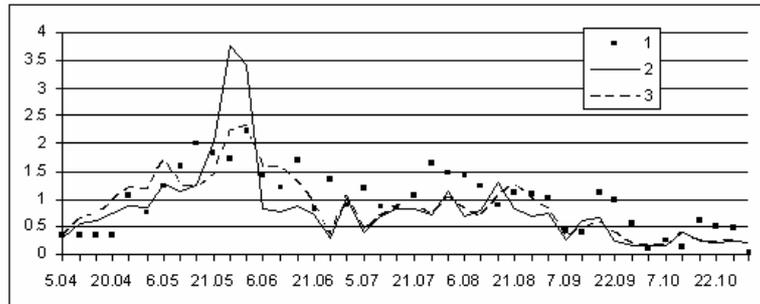


Рис. 5. Временной ход суммарного испарения, измеренного с помощью почвенного испарителя (1) и вычисленного по модели по спутниковым (2) и наземным (3) LAI и В для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

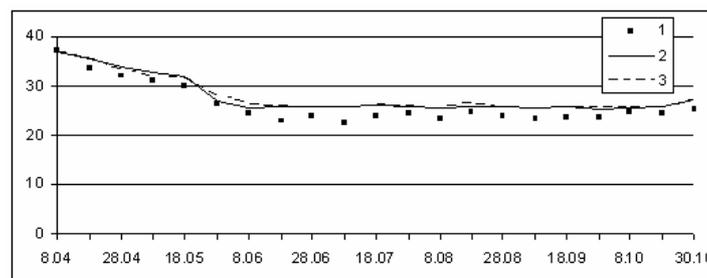


Рис. 6. Временной ход влагозапасов почвы, измеренных (1) и рассчитанных по модели по спутниковым (2) и наземным (3) LAI и В для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.

Поскольку эффективность применения моделей типа SVAT зависит от принятого способа распространения данных "точечных" наблюдений на различные по площади участки территории (т.е. от корректности агрегации тех гидрометеозлементов и характеристик подстилающей поверхности, которые используются в качестве переменных и параметров модели), важным при введении в модель полученных по спутниковой информации значений таких характеристик является вопрос о масштабе пространственного осреднения спутниковых данных. В настоящей работе для всех рассматриваемых сезонов вегетации выполнены численные эксперименты по оценке значений  $T_a$  и  $T_{s,eff}$  при выборе в качестве элемента осреднения данных AVHRR ячеек размером  $3 \times 3$  и  $9 \times 9$  пикселей ( $\sim 5 \times 7$  и  $\sim 15 \times 21$  км<sup>2</sup>). Оказалось, что разброс значений  $T_a$  и  $T_{s,eff}$  для разных ячеек не превышает ошибок определения этих величин по данным AVHRR. Подобные результаты, во-первых, позволяют проводить осреднение спутниковых данных для введения в модель по большим по размеру территориям, которые, как следствие, будут характеризоваться одними и теми же значениями параметров модели, а во-вторых, являются косвенным подтверждением возможности использования единой эмпирической зависимости LAI от NDVI (типа приведенной выше) для сельскохозяйственных культур, доминирующих на изучаемом водосборе.

В работе исследовалось также 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 может составить 4-5 градусов, несовпадение времени спутниковой съемки и срочных наблюдений на агрометеостанциях (результаты которых вводятся в модель) 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  $T_s$ ,  $T_{s,eff}$  и  $T_s$  лежат в пределах значений указанной погрешности. (Исключения могут составлять "выбросы" значений температур, обусловленные локальными перегревами). Такие результаты позволяют производить оценки вертикальных потоков влаги при прямом введении в модель значений температур, определенных по спутниковым данным (рис.7). Подобный подход имеет целью разработку методов оценки вертикальных потоков влаги и тепла с поверхности речных водосборов при минимальном использовании данных наземных наблюдений.

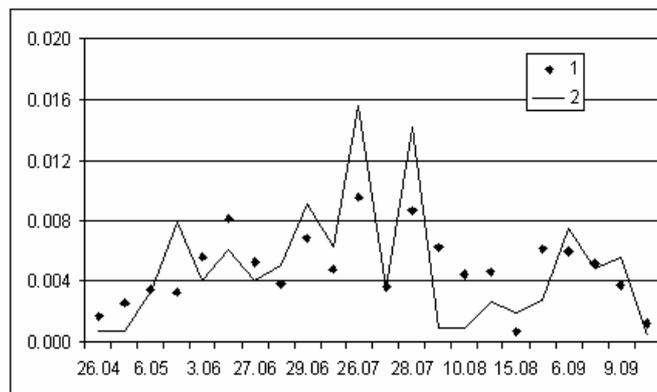


Рис. 7. Транспирация растительности, рассчитанная по модели с использованием значений температур растительного покрова, определенных по данным радиометра AVHRR (1) и с помощью модели (2) для участка озимой пшеницы на агрометеостанции Курск для сезона вегетации 2003 г.

## Заключение

Основными результатами настоящей работы являются: 1) созданные методы тематической обработки данных измерений радиометра AVHRR/NOAA для оценки радиационной температуры подстилающей поверхности, температуры поверхности почвы и растительного покрова, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B; 2) разработанные способы использования спутниковых оценок этих величин в 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. В рамках первого направления исследований проведено сравнение двух созданных методов обработки данных AVHRR, по результатам которого для получения оценок названных величин выбран один из них. В рамках второго направления исследована возможность замены данных наземных наблюдений при задании временного хода LAI и B, используемых в качестве параметров модели, на спутниковые оценки этих величин. Такая возможность подтверждена 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 LAI и B по данным AVHRR для расчета компонент водного баланса речного водосбора. В работе исследованы также возможности агрегации характеристик подстилающей поверхности и гидрометеоэлементов, являющихся параметрами или переменными модели, для установления наибольшего соответствия их спутниковых и модельных значений.

Исследовано влияние суточного хода значений параметров растительного покрова на оценки температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным. Описанное объединение спутникового и модельного методов оценки характеристик подстилающей поверхности позволяет производить расчеты вертикальных потоков влаги с обширных территорий при недостатке или отсутствии данных наземных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант № 04-05-65062.

## 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. 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.
3. Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas // Rem. Sens. Env., 1996. V.57. P.167-184.
4. Snyder W.C., et al. Classification based emissivity for land surface temperature measurement from space // Int. J. Rem. Sens., 1998. V.19. P.2753-2774.
5. Govard S.N., et al. Ecological remote sensing at OTTER: satellite macroscale observations // Ecological Applications, 1994. №4. P.332-343.
6. Lakshmi V., Czajkowsky K., Dubayah D., Susskind J. Land surface air temperature mapping using TOVS and AVHRR // Int. J. Rem. Sens., 2001. V.22. №4. P.643-662.
7. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П. Моделирование влагопереноса в системе почва-растительность-приземный слой атмосферы для гидрологических задач // Водные ресурсы, 1989. №2. С.32-39.
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 // Hydrol. Sci. J., 1991. V.36. №6. P.631-643.
9. Музылев Е.И., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П. Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием синхронной спутниковой информации высокого разрешения // Метеорология и гидрология, 2002. №5. С.68-82.
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. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS). Report № 27. Ed. by BAHС Core Project Office. Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Germany. 1993. 103 p.
12. 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.