

Моделирование водного режима территории крупного сельскохозяйственного региона с использованием данных измерений геостационарных метеорологических спутников

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

¹ *Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*

E-mail: muzylev@aqua.laser.ru

² *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
Москва, Россия*

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Разработана версия физико-математической модели влаго- и теплообмена покрытых растительностью обширных участков суши с атмосферой, предназначенная для расчета характеристик водного и теплового режимов этих участков за вегетационный период. Модель рассчитана на использование в качестве параметров и входных переменных оценок характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик, полученных по данным радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua), SEVIRI (геостационарный ИСЗ Meteosat-9) в виде распределений их значений по площади исследуемого региона. Описаны разработанные новые и усовершенствованные технологии построения таких оценок по результатам тематической обработки и анализа данных измерений названных сенсоров. Эти технологии адаптированы к территории части Центрально-Черноземного региона России площадью 227 300 км². Также описаны процедуры усвоения в модели полученных спутниковых оценок. С помощью модели, рассчитанной на использование спутниковых данных, построены поля значений влагосодержания почвы, суммарного испарения и других характеристик водного режима исследуемого региона за сезоны вегетации 2009–2011 гг.

Ключевые слова: моделирование характеристик водного режима, спутниковые данные, тематическая обработка, температура подстилающей поверхности, растительный покров, пространственная изменчивость.

Введение

Получение наиболее точных и надежных на сегодняшний день оценок характеристик водного режима обширных территорий возможно при использовании разработанных с разной степенью детальности моделей взаимодействия поверхности суши с атмосферой (LS-моделей – Land Surface Models); причем качество расчетов этих величин в значительной мере определяется адекватностью описания физических процессов в моделях и содержанием и полнотой их информационного обеспечения. Эта полнота связана с принятым способом распространения данных «точечных» наземных наблюдений на различные по площади участки территории, т.е. со способом агрегации характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик, являющихся переменными или параметрами модели, а также определяется возможностью получения информации об этих характеристиках, дополнительной к традиционной наземной. Привлечение материалов спутниковой съемки для реализации такой возможности является решающим фактором при разработке модели, пригодной для оценки влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного режима обширных участков суши, особенно при редкой сети наземных наблюдений. По результатам обработки информации с борта

полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников можно получать оценки радиационной и термодинамической температур, излучательной способности и альbedo подстилающей поверхности, характеристик растительности, облачности и осадков и производить регулярное картирование их полей.

В соответствии с изложенными основными задачами настоящей работы являлись:

- 1) создание новых и усовершенствование существующих методов и технологий тематической обработки данных измерений радиометров-сканеров AVHRR / NOAA, MODIS / EOS Terra и Aqua и SEVIRI (геостационарный Meteosat-9) и построения полей оценок характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик для исследуемой территории;
- 2) разработка процедур использования в модели этих оценок в качестве параметров или входных переменных при учете пространственной неоднородности их полей;
- 3) расчет с помощью адаптированной к спутниковым данным модели характеристик водного режима рассматриваемого региона за сезоны вегетации 2009–2011 гг.

В качестве исследуемой была выбрана находящаяся в лесостепной зоне России территория части сельскохозяйственного Центрально-Черноземного региона (ЦЧР) площадью 227 300 км² с координатами 49° 30' – 54° с. ш. и 31° – 43° в. д., включающая Курскую, Белгородскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области. База наземных данных, использовавшихся в работе, содержит результаты стандартных срочных трехчасовых измерений метеорологических характеристик, а также ежедекадных измерений влажности и температуры почвы под различными культурами за упомянутые сезоны вегетации на 48 находящихся в регионе агрометеорологических станциях.

Краткое описание LS-модели

Разработанная для периода вегетации LS-модель предназначена для расчета суммарного испарения E_v (испарения с голой почвы и транспирации влаги растительностью), влагозапасов почвы W , распределений влажности и температуры почвы по глубине, вертикальных потоков скрытого и явного тепла с подстилающей поверхности, температуры поверхностей почвы T_g и растительного покрова T_p , а также радиационной температуры подстилающей поверхности (ТПП) T_s . Структура модели, основные уравнения, использовавшиеся для описания процессов вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва – растительность – атмосфера», способы задания параметров модели и результаты ее верификации освещены в работах (Музылев и др., 2002, 2005, 2010; Gelfan et al., 2012), и мы не будем на них останавливаться. В качестве параметров модели использовались характеристики почв и растительного покрова, с помощью которых учитывались различия свойств подстилающей поверхности, а в качестве входных переменных – метеорологические характеристики, представлявшие различия метеоусловий. Результаты испытаний модели показали, что с ее помощью можно удовлетворительно воспроизводить водный и тепловой режимы почвы и растительности на небольших однородных участках территории, для которых данные измерений на агрометеостанциях могут считаться репрезентативными

и параметры и переменные модели могут быть заданы по этим данным. Корректность же описания процессов влаго- и теплообмена на обширных территориях напрямую зависит от возможностей получения для этих территорий спутниковых оценок характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик, которые могут использоваться в качестве основных модельных параметров и переменных. К таким характеристикам относятся листовой индекс LAI, проективное покрытие растительностью V , температуры T_s и T_f (и их спутниковые аналоги), осадки.

Краткое описание методов построения оценок характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по спутниковым данным

По данным AVHRR NOAA в условиях безоблачной атмосферы производились оценки трех видов ТПП: температур поверхности почвы T_{sg} и воздуха на уровне растительного покрова T_a , эффективной ТПП $T_{s,eff}$, а также излучательной способности E , нормализованного индекса вегетации NDVI, V и LAI. Разработанные методы тематической обработки данных AVHRR (Музылев и др., 2002, 2005, 2010) были усовершенствованы и адаптированы к району исследований. Оценки ТПП строились при использовании метода «расщепленного окна прозрачности» (Wan, Dozier, 1996; Успенский, Щербина, 1996; Uspensky et al., 1999). Значения LAI для разных типов культур определялись по эмпирическим зависимостям от NDVI для условий степи (Biftu, Gan, 2001; Biospheric Aspects, 1993). Для проверки достоверности полученных оценок ТПП статистика ошибок их определения была проанализирована путем сравнения с результатами наблюдений на агрометеостанциях региона. Среднеквадратические отклонения (СКО) для T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ составили в рассматриваемые сезоны, соответственно, 2,3–2,7, 3,7–4,9 и 2,4–3,5°C.

По данным MODIS / EOS Terra и Aqua строились оценки ТПП T_{ls} , E , NDVI и LAI. Для этого с веб-сайта LP DAAC (NASA) (<https://lpdaac.usgs.gov>) загружались два вида оценок T_{ls} : продукты уровня 3 (MOD11B1) на квазирегулярной сетке с разрешением $\sim 4,8$ км и продукты уровня 2 (MOD11_L2) с разрешением ~ 1 км. Пространственное разрешение для величин NDVI и LAI, определяемых раз в восемь дней, составляет 1 км. Затем с помощью разработанного программного обеспечения выполнялись форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов дистанционного зондирования. Достоверность оценок T_{ls} по данным MODIS подтверждена результатами их сравнения с данными наземных наблюдений и с аналогичными оценками по синхронным данным AVHRR и SEVIRI. Для большинства сроков оценки T_{ls} с разрешением 4.8 км оказались более достоверными, чем с разрешением 1 км. СКО оценок T_{ls} (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышали 3,5°C, а разности оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR) лежали в диапазоне 2,0–4,0°C.

Набор описанных данных дистанционного зондирования был дополнен оценками T_{ls} , T_a и E для светлого и темного времени суток и ежесуточными оценками LAI по данным SEVIRI/Meteosat-9 для тех же сезонов вегетации. Оценки T_{ls} были построены с помощью

разработанной технологии тематической обработки данных (Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010а, б), заключающейся в последовательном применении локального алгоритма «расщепленного окна прозрачности» (Wan, Dozier, 1996) и метода «двух температур» (Faysash, Smith, 2000) и использующего данные SEVIRI в ИК каналах № 9 и 10 (10,8 и 12 мкм) при отсутствии облачности за три последовательных срока без задания с хорошей точностью начальных приближений для E . Технология адаптирована к исследуемой территории части ЦЧР. Анализ достоверности оценок T_{ls} проводился путем сопоставления с аналогичными синхронными независимыми оценками, полученными по данным SEVIRI в LSA SAF (Прикладном центре анализа спутниковых данных о поверхности Земли, Лиссабон, Португалия). Величины усредненных за месяц СКО значений T_{ls} от оценок T_{ls} (LSA SAF) после коррекции систематических смещений были заключены в диапазоне 1,1–2,1°C для различных месяцев и сроков светлого и темного времени суток рассматривавшихся сезонов вегетации, что с учетом погрешности оценок T_{ls} (LSA SAF), составлявшей 1,5–2,5°C, можно считать приемлемым. Достоверность оценок T_{ls} (SEVIRI) для исследуемой территории была подтверждена также результатами сравнения с оценками T_{ls} (MODIS) и T_{ls} (AVHRR) за сезоны вегетации 2010–2011 гг. СКО T_{ls} (SEVIRI) от T_{ls} (MODIS) лежали в пределах 3,3–3,5°C. Расхождения между этими величинами можно, по-видимому, объяснить их разным пространственным разрешением и несинхронностью съемки, а также использованием различных процедур совмещения пар данных оценок. Пример сравнительного анализа полей T_{ls} (SEVIRI) и T_{ls} (MODIS) за один срок (12.00 UTC 01.07.2010 г.) представлен на *рис. 1а, б, в, г*. Из рисунков видно, что эти поля имеют схожую пространственную структуру; разность T_{ls} (MODIS) – T_{ls} (SEVIRI) для большинства пикселей лежит в указанных выше пределах; поведение оценок T_{ls} (SEVIRI) вдоль произвольно выбранного разреза подобно поведению оценок T_{ls} (MODIS). Пример сопоставления полей значений $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_{ls} (SEVIRI), а также их разности на одну из дат сезона вегетации 2011 г. представлен на *рис. 2б, в, г*.

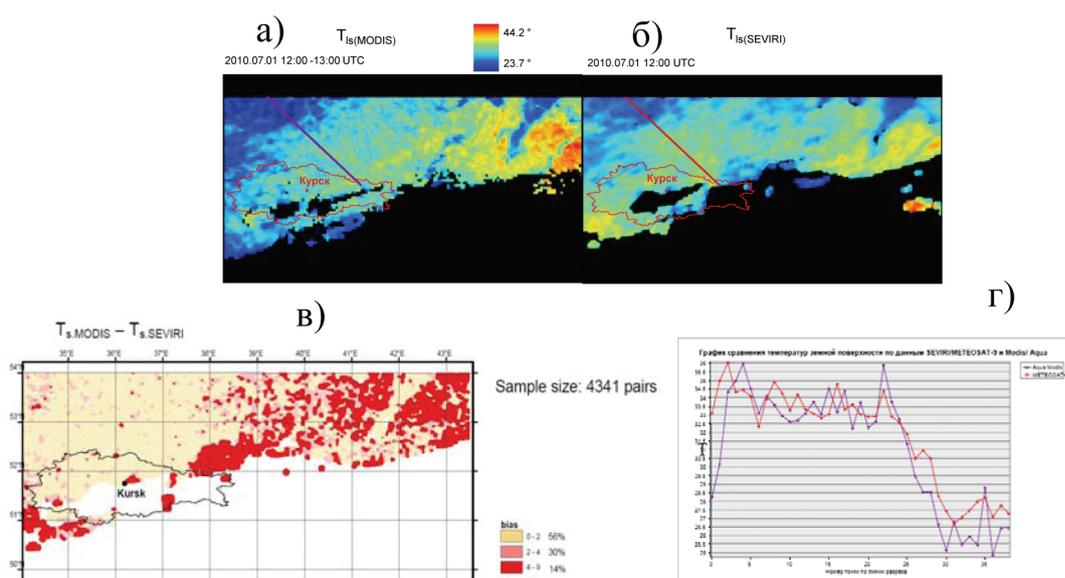


Рис. 1. Поля оценок T_{ls} (MODIS) (а), T_{ls} (SEVIRI) (б) и их разности (в) для территории части ЦЧР и ход этих оценок вдоль произвольно выбранного разреза (г) для 12.00 UTC, 01.07.2010 г.

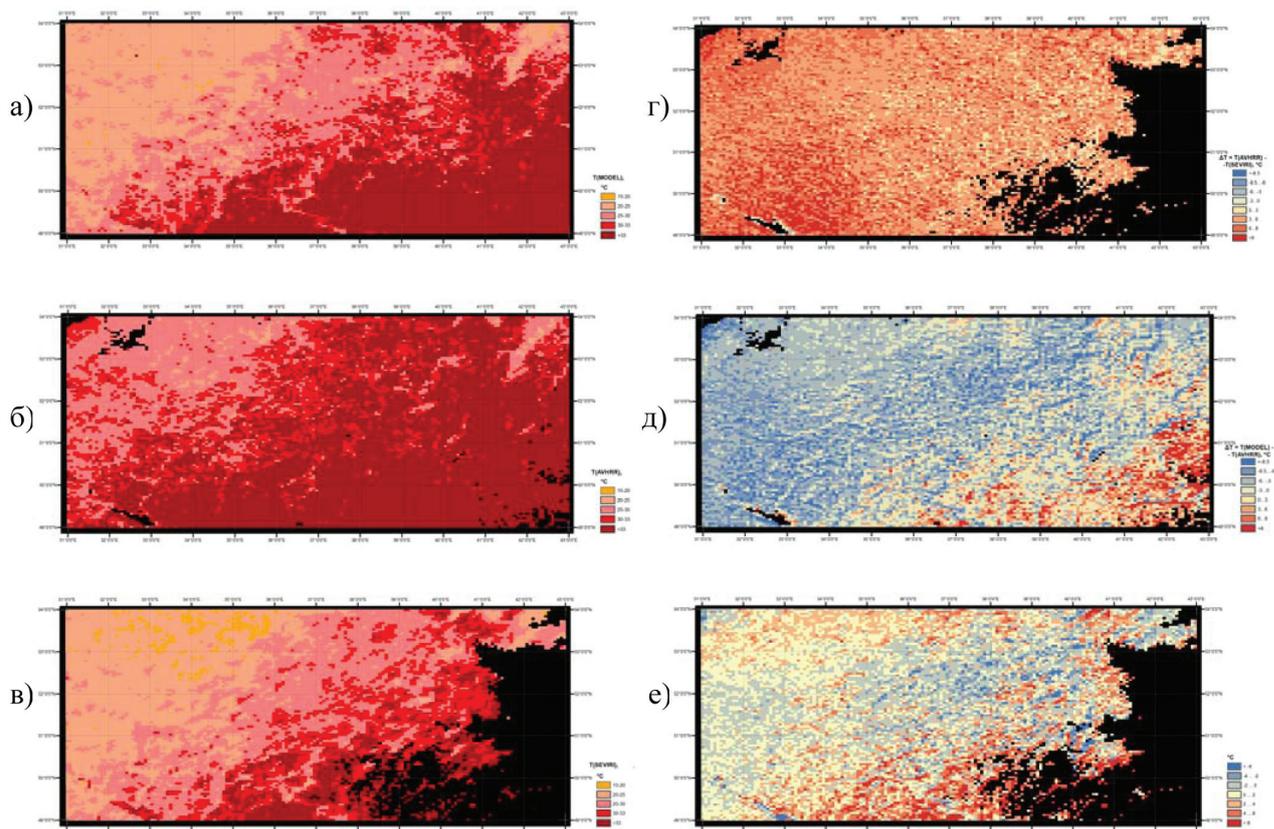


Рис. 2. Температура подстилающей поверхности ТПП, рассчитанная по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений T_s (а), определенная по данным AVHRR $T_{s,eff}$ (AVHRR)(б) и SEVIRI T_{ls} (SEVIRI) (в), и разности $T_{s,eff}$ (AVHRR) – T_{ls} (SEVIRI) (г), $T_s - T_{s,eff}$ (AVHRR)(д), $T_s - T_{ls}$ (SEVIRI) (е) для исследуемой территории площадью 227 300 км² на 12 ч. 29.08.2011 (время местное)

Как следует из рисунков, для большей части территории значения этой разности не превышают погрешности оценки ТПП по данным AVHRR. Оценки T_a (SEVIRI), принимаемой при моделировании за температуру растительности, были получены с помощью предложенного в работе (Успенский и др., 2011) нового метода, предполагающего построение линейной регрессионной связи между T_{ls} , определяемой по спутниковой информации, и результатами наземных измерений T_a с привлечением данных о времени суток, зенитном угле Солнца, высотах земной поверхности и последующее использование этой связи для дистанционного определения T_a . Сравнение спутниковых оценок T_a с данными синхронных наземных наблюдений на сети метеостанций ЦР для стандартных синоптических сроков летних периодов 2009–2011 гг. дает величины СКО в диапазоне 1,8–2,9°C, что следует признать вполне удовлетворительным. Попиксельные оценки LAI для ЦР по данным SEVIRI, использовавшиеся при расчетах, были получены в LSA SAF по измерениям в каналах 0,6, 0,8 и 1,6 мкм при отсутствии облачности (они производятся ежедневно с 5-дневным усреднением (за предшествующие четыре дня и текущий день) и входят в состав оперативно распространяемых выходных продуктов). Привлечение данных в канале 1,6 мкм приводит к повышению достоверности оценок LAI.

Разработка процедур использования спутниковых оценок характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик для исследуемого региона в модели формирования его водного режима

Расчеты по модели, адаптированной к спутниковой информации, производились с использованием регулярной вычислительной сетки, в узлах которой выполнялись оценки параметров и входных переменных модели и вычислялись значения влагосодержания почвы W , суммарного испарения E_v и других характеристик водного и теплового режимов, а также ТПП T_p , T_g и T_s . Размер ячейки сетки, накладывавшейся на карту исследуемого региона, составлял 3 x 3 пиксела радиометра AVHRR ($\sim 7 \times 5 \text{ км}^2$) (при размере пиксела для ИК каналов AVHRR в $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе, разрешении для аналогичных каналов MODIS в 1 и 4,8 км и для таких же каналов SEVIRI – $0,05^\circ$ по широте и $0,06^\circ$ по долготе совмещение данных сеток производилось с помощью специально разработанных программ). Также в узлах сетки по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI были построены оценки всех названных выше характеристик растительности и ТПП. Сравнение значений ТПП, рассчитанных по модели, с определенными по данным AVHRR и MODIS производилось для нескольких безоблачных дней каждого из сезонов вегетации 2009–2011 гг., а с определенными по данным SEVIRI – по трехчасовым интервалам для нескольких продолжительных безоблачных периодов тех же сезонов. Для большинства дней в каждом из этих сезонов разности значений $T_s - T_{s,\text{eff}}$, $T_s - T_{ls}$, $T_f - T_a$ не превышали величин погрешностей оценки $T_{s,\text{eff}}$ и T_a по данным AVHRR. В качестве примеров на *рис. 2а–е* представлены распределения по площади исследуемого региона модельных и спутниковых (AVHRR и SEVIRI) оценок ТПП и их всевозможных разностей на одну из дат сезона вегетации 2011 г., а на *рис. 3* – временные ходы за этот же сезон, соответственно, значений температур T_{ls} и T_a , определенных по данным SEVIRI, и T_s и T_p , рассчитанных по модели при использовании данных наземных наблюдений на одной из агрометеостанций региона. Наибольшие расхождения модельных и спутниковых оценок ТПП за отдельные сроки характерны для жарких летних дней, они могут быть обусловлены локальным перегревом поверхности (до 60°C и выше во второй половине дня), несовпадением моментов времени спутниковых и наземных измерений, а также естественной генерализацией спутниковых данных.

Для усвоения в модели описанных данных дистанционного зондирования были разработаны процедуры: 1) замены оценок, являющихся параметрами модели листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B по наземным данным на их спутниковые оценки; 2) ввода в модель в качестве входных переменных оценок ТПП $T_{s,\text{eff}}$, T_{ls} и T_a по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI вместо данных их наземных измерений; 3) учета в модели пространственной изменчивости полей LAI, B и ТПП, построенных по данным упомянутых сенсоров, и оценок метеорологических характеристик, полученных с помощью интерполяционных методов по данным наземных наблюдений, путем введения в модель значений всех названных характеристик в каждом узле вычислительной сетки. Реализация первой из данных процедур подробно описана в работе (Музылев и др., 2012). В данной работе корректность такой замены была подтверждена путем трех сравнений: временных ходов LAI

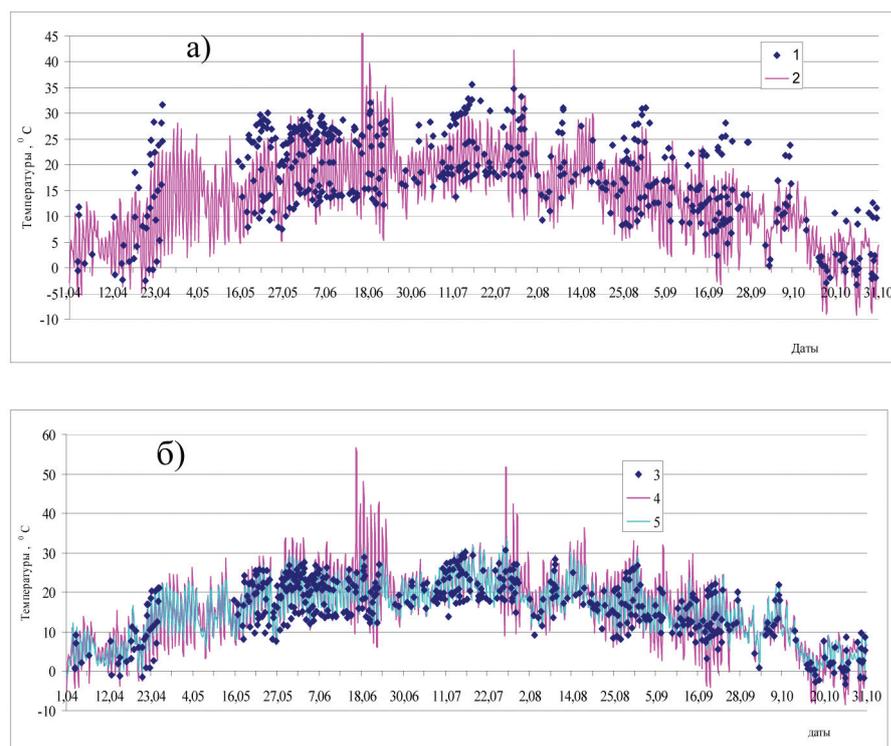


Рис. 3. Определенные по данным SEVIRI (1), (3) и рассчитанные по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений на агрометеостанции Рылск (2), (4) для сезона вегетации 2011 г. радиационная температура подстилающей поверхности T_s (SEVIRI) (1) и T_s (MODEL) (2) и температура поверхности растительного покрова T_a (SEVIRI) (3) и T_a (MODEL) (4). (5) – измеренная температура воздуха

за период вегетации, построенных по данным наземных и спутниковых измерений; модельных оценок T_s и T_f с их спутниковыми аналогами $T_{ls,eff}$, T_{ls} и T_a и данными наземных измерений ТПП; фактических и рассчитанных с помощью модели значений суммарного испарения E_v (рис. 4) и содержания влаги в метровом слое почвы W (рис. 5а, б). Из результатов этих сравнений видно, что для большинства дат расхождения значений LAI не превышают разброса его значений, обусловленного мелкомасштабной стохастической изменчивостью (Gelfan et al., 2012), расхождения между $T_{ls,eff}$ и T_s , T_{ls} и T_s , T_a и T_f и измеренной ТПП не превосходят величин погрешностей оценки T_{ls} и T_a по данным AVHRR, а различия фактических (кривые 1 на рис. 4 и 5а, б) и рассчитанных для разных вариантов оценки LAI значений E_v и W (кривые 2 и 3 на тех же рисунках) находятся в стандартных пределах.

При проведении другой процедуры использования в модели спутниковых данных – замены наземных оценок ТПП на спутниковые на каждом временном шаге – адекватность результатов расчетов характеристик водного и теплового режимов региона обеспечивается синхронностью наземных и спутниковых измерений ТПП, поскольку привлечение разновременных наземных и спутниковых данных из-за различий значений температуры, обусловленных ее внутрисуточным ходом, может приводить к существенным расхождениям оценок суммарного испарения и влагосодержания почвы. Это относится к данным AVHRR и MODIS, частота получения которых не превышает двух раз в сутки для каждого из спутников NOAA-18, EOS Terra или Aqua. При использовании данных SEVIRI / Meteosat-9 с частотой измерений

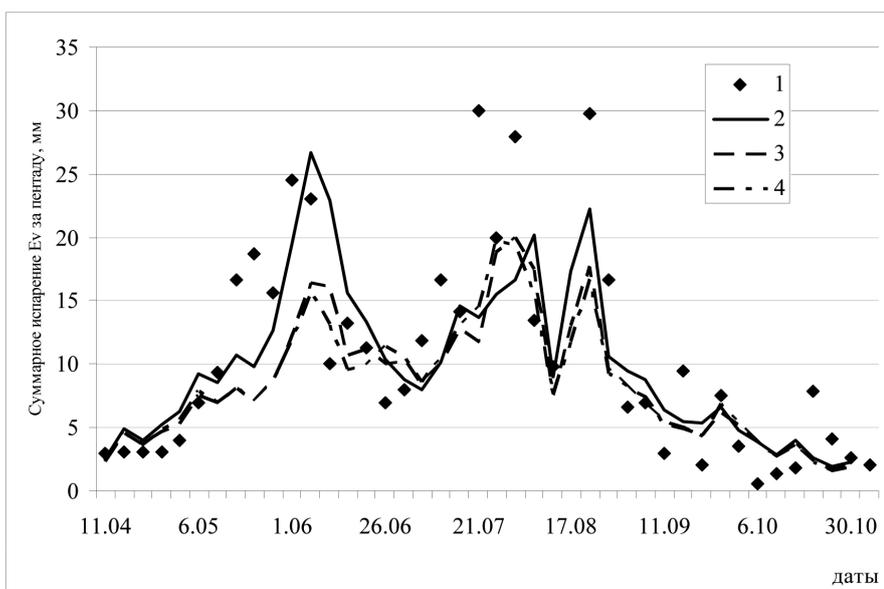


Рис. 4. Значения суммарного испарения E_t за пентаду для сезона вегетации 2011 г.: измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по данным AVHRR для зерновых культур (2) и по данным MODIS (3) и (4) (при оценке температуры поверхности растительного покрова по данным срочных наземных измерений (3) и по данным SEVIRI (4))

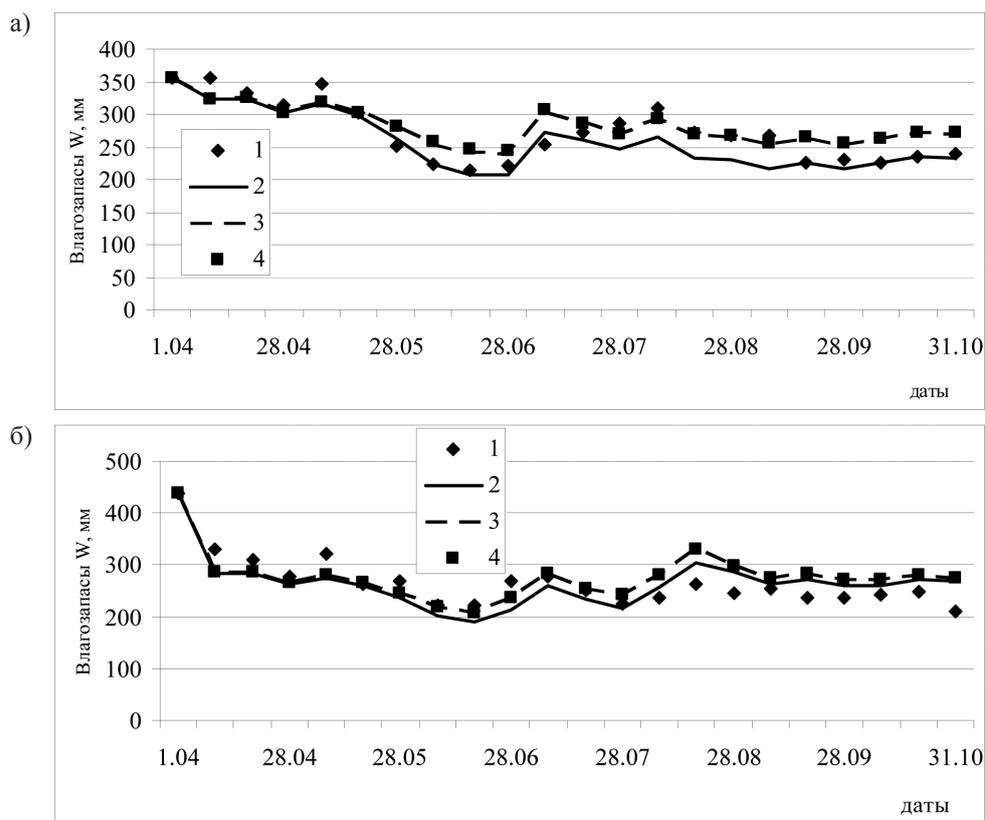


Рис. 5. Временной ход влагозапасов почвы (в мм слоя) для сезона вегетации 2011 г.: измеренных на воднобалансовой станции Нижнедевицк (а) и на агрометеостанции Рыльск (б) под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI по данным AVHRR для зерновых (2) и по данным MODIS (3), (4) (при оценке температуры поверхности растительного покрова по данным срочных наземных измерений (3) и по данным SEVIRI (4))

раз в 15 минут и последующим трехчасовым осреднением возникает трудность другого порядка – необходимость существования безоблачных периодов большой продолжительности, обеспечивающего возможность формирования длинного многодневного ряда непрерывных внутрисуточных измерений, что особенно сложно для обширной территории. Примеры сравнения временных ходов T_{ls} (SEVIRI) и T_s (MODEL), T_a (SEVIRI) и T_f (MODEL) за сезон вегетации 2011 г. представлены выше (рис. 3). Распределения по площади исследуемого региона разности значений $T_s - T_{ls}$ (SEVIRI) на конкретную дату сезона вегетации 2011 г. также приведены выше (рис. 2e). Результаты соответствующих расчетов влагосодержания почвы и суммарного испарения (или потоков скрытого тепла за каждые три часа) представлены на рис. 4 и 5a, б кривыми 3 и 4 и на рис. 6a, б. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что оценки ТПП по спутниковым данным могут вводиться в модель для прямых расчетов водного и теплового режимов исследуемой территории, причем эффективность подобных расчетов будет повышаться с увеличением продолжительности временного промежутка непрерывных спутниковых измерений.

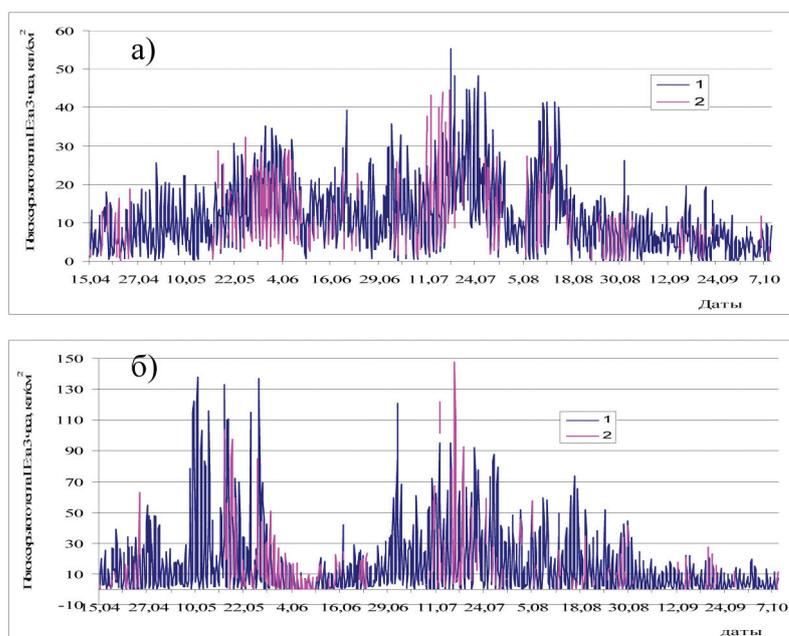


Рис. 6. Рассчитанные по модели потоки скрытого тепла LE за каждые три часа для воднобалансовой станции Нижнедевицк (а) и агрометеостанции Жуковка (б) при использовании оценок температур подстилающей поверхности, полученных по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений (1) и по данным SEVIRI (2), за сезон вегетации 2011 г.

Для учета при моделировании пространственной неоднородности полей спутниковых оценок характеристик растительного покрова и метеохарактеристик были разработаны алгоритмы и программы ввода в модель определявшихся по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI значений $T_{s,eff}$, T_{ls} , T_a , LAI и В в узлах вычислительной сетки. Рис. 2б, в иллюстрирует реализацию разработанной процедуры, представляя пространственные распределения значений температур для конкретного срока сезона вегетации 2011 г. Аналогичные распределения построены для LAI и В. Для тех сроков, в которые спутниковая информация

о ТПП в конкретных узлах сетки или для всей территории отсутствовала, значения этой величины рассчитывались с помощью процедуры интерполяции IWDM (Inverse weighted distance method) по данным измерений ТПП на агрометеостанциях. С помощью этой же процедуры в узлах сетки по данным стандартных сетевых метеорологических наблюдений рассчитывались значения интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, и таким образом были получены их распределения по площади исследуемого региона.

Значения всех перечисленных величин в виде их построенных распределений вводились в модель для расчета искомых характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории – суммарного испарения E_v , тепло- и влагосодержания W почвы, инфильтрации воды в почву, потоков влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие слои, потоков скрытого LE и явного H тепла, а также ТПП трех типов: радиационной температуры T_s , температуры поверхности растительного покрова T_f и голой почвы T_g . Все расчеты производились для части ЦЧР площадью 227 300 км² для сезонов вегетации 2009–2011 гг. Точность оценок E_v и W проверялась путем сравнения их вычисленных и измеренных значений, а в отсутствие измерений E_v – по результатам сопоставления его значений, рассчитанных для всех возможных вариантов оценки LAI, B , $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_a по спутниковым данным. Для всех этих вариантов различия значений E_v не превышали нескольких мм за пентаду (рис. 4 и ба, б). Такая погрешность лежит в пределах стандартной ошибки оценки испарения (~ 20–25%). При этом отдельные выбросы могут получаться, например, за счет резкого увеличения транспирации после локальных выпадений осадков большой интенсивности, местных перегревов подстилающей поверхности в послеполуденные часы, которые не всегда фиксируются моделью, погрешностями оценок LAI и ТПП. Стоит заметить, однако, что само количество случаев наблюдений за испарением в течение сезона вегетации для всего региона измеряется единицами и их данные трудно считать репрезентативными, поэтому к результатам сравнения рассчитанных и измеренных значений E_v следует относиться с осторожностью. При этом стоит обратить внимание на весьма небольшие различия результатов расчета E_v при использовании оценок LAI и B по данным AVHRR и SEVIRI для трав и по данным MODIS. Следует также специально подчеркнуть близость значений E_v , рассчитанных при использовании оценок ТПП, полученных по данным SEVIRI и срочным трехчасовым данным наземных наблюдений. Временные ходы влагозапасов почвы W , рассчитанных при оценках LAI и B по данным AVHRR и MODIS и при использовании оценок T_{ls} и T_a по данным SEVIRI, также оказались весьма близкими временному ходу значений W , измеренных на агрометеостанциях (рис. 5а, б). Ошибки оценки W для разных вариантов расчетов не превышают 10–15% и находятся в стандартных пределах.

Все выходные продукты моделирования – E_v , W , LE , H и другие характеристики водного и теплового режимов исследуемого региона получены в виде распределений названных величин по его площади. На рис. 7а–в представлены распределения по всей территории значений потока скрытого тепла LE , рассчитанного с использованием оценок ТПП по наземным данным, разности этого потока с рассчитанным при использовании данных SEVIRI и влагозапасов почвы W , рассчитанных при использовании данных SEVIRI, на одну из дат сезона вегетации 2011 г.

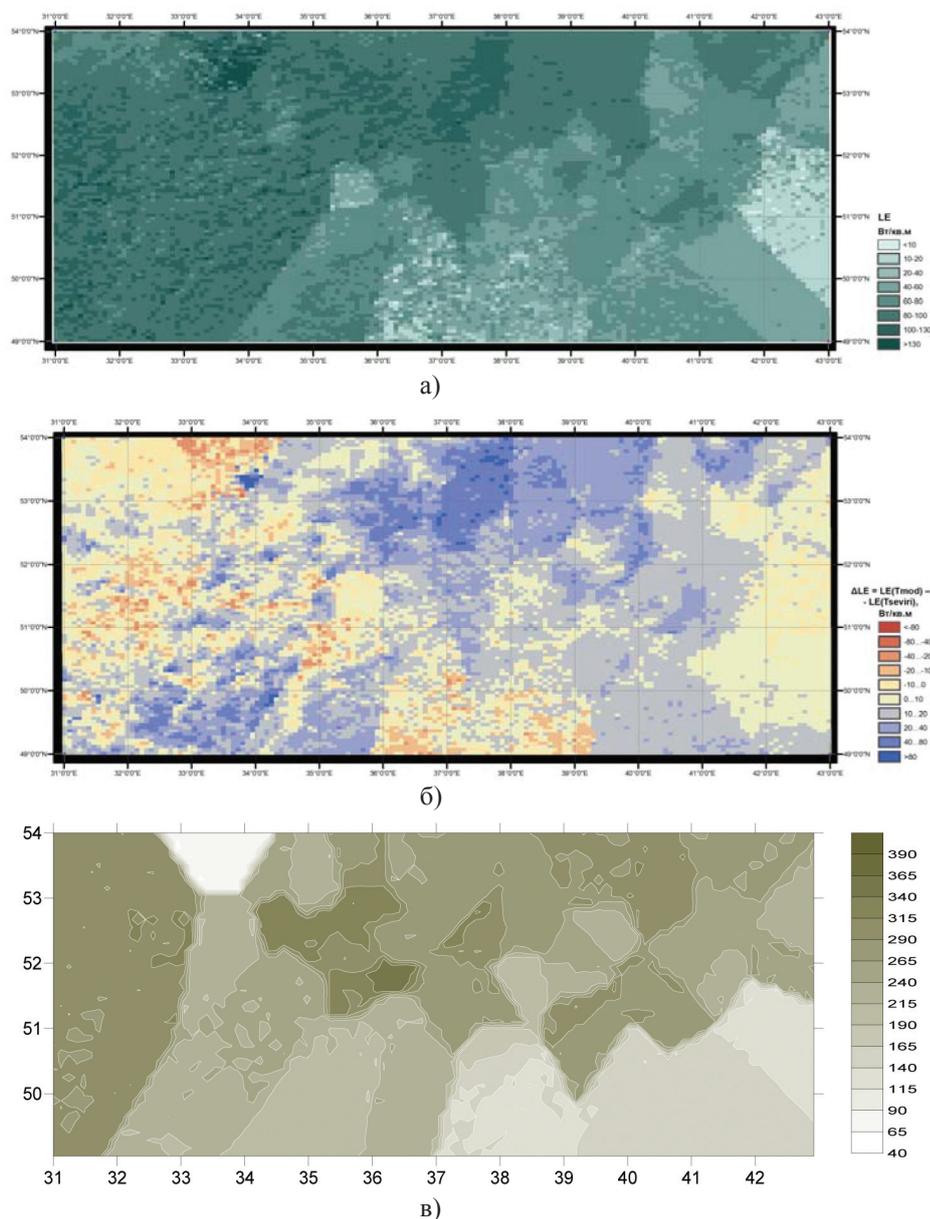


Рис. 7. Поток скрытого тепла за сутки LE (Bt/m^2), рассчитанный по модели с использованием оценок температуры подстилающей поверхности по данным срочных наземных измерений (а), его разность с потоком, рассчитанным с использованием оценок температуры по данным SEVIRI (б), и запасы почвенной влаги (мм слоя), рассчитанные при использовании данных SEVIRI (в), для исследуемой территории площадью $227\,300\text{ км}^2$ на 29 августа 2011 г.

Заключение

Основными результатами проведенных исследований можно считать:

- разработанные или усовершенствованные технологии построения оценок ТПП и характеристик растительного покрова по данным AVHRR / NOAA, MODIS / Terra и Aqua, SEVIRI / Meteosat-9 и их адаптацию к территории ЦЧР;
- разработанные способы использования в модели формирования водного и теплового режимов обширной территории построенных по спутниковым данным оценок характеристик растительности и ТПП с учетом их пространственной изменчивости;

- оценки характеристик водного и теплового режимов территории значительной части ЦЧР для нескольких сезонов вегетации.

Предложенный подход может быть применен для территорий с редкой сетью наземных наблюдений.

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. 35–44.
3. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Моделирование составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 3. С. 118–133.
4. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Гельфан А.Н., Успенский С.А., Александрович М.В.* Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и снежного покрова при моделировании составляющих водного и теплового балансов обширных территорий сельскохозяйственного назначения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 258–268.
5. *Соловьев В.И., Успенский С.А.* Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения. // *Исследование Земли из космоса*. № 3. 2009. С. 79–89.
6. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.* Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // *Метеорология и гидрология*. 2010 а. № 3. С. 5–17.
7. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.* Развитие методов мониторинга температуры поверхности суши по данным геостационарных спутников нового поколения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010 б. Т. 7. № 2. С. 67–74.
8. *Успенский С.А., Успенский А.Б., Рублев А.Н.* Анализ возможности мониторинга приповерхностной температуры воздуха по данным геостационарных метеорологических спутников // *Сб. тезисов Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика»*, СПб, 2011. С. 37–38.
9. *Успенский А.Б., Щербина Г.И.* Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с ИСЗ NOAA // *Исследование Земли из космоса*. 1996. № 5. С. 4–13.
10. *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.

11. *Faysash A., Smith E.A.* Simultaneous retrieval of diurnal to seasonal surface temperatures and emissivities over SGP ARM-CART site using GOES split window. // *J. Appl. Meteor.* 2000. V. 39. P. 971–982.
12. *Gelfan A., Muzylev E., Uspensky A., Startseva Z., Romanov P.* Remote sensing based modeling of water and heat regimes in a vast agricultural region. // *Remote Sensing – Applications*. Ed. Boris Escalante-Ramirez. InTech – Open Access Publisher, Rijeka, Croatia. 2012. Ch. 6. P. 141–176.
13. *Uspensky A.B. et al.* Derivation of surface skin temperature from high resolution IR radiance measurements // *J. Earth Res. from Space*. 1999. V. 4. P. 21–31.
14. *Wan Z., Dozier J.* A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1996. V. 34. No. 4. P. 892–905.
15. *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.

Simulation of the water regime of a vast agricultural region territory utilizing measurement data from geostationary meteorological satellites

**E.L.Muzylev¹, A.B. Uspensky², Z.P. Startseva¹,
E.V. Volkova², A.V. Kucharsky², S.A. Uspensky²**

¹ *Water Problem Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
E-mail: muzylev@aqua.laser.ru

² *Planeta State Research Center of Space Hydrometeorology, Moscow, Russia*
E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

The physical-mathematical model of water and heat exchange of vast vegetation covered land areas with atmosphere has been developed to calculate the water and heat regimes of these areas during vegetation season. The model is adjusted to utilize area-distributed estimates of the land surface and meteorological characteristics derived from satellite-based measurements of radiometers AVHRR / NOAA, MODIS / EOS Terra and Aqua, and SEVIRI / Meteosat-9 as the model parameters and variables. New developed and refined technologies to build such estimates based on thematic processing and analyzing named sensor measurement data are described. These technologies are adapted to the territory of the Central Black Earth Region of the European Russia with area of 227,300 km². The procedures to assimilate obtained satellite-derived estimates in the model are also described. Using the model intended for utilization of satellite data there have been built the fields of soil water content, evapotranspiration and other water regime characteristics of the study region.

Keywords: simulation of water regime characteristics, satellite data, thematic processing, land surface temperature, vegetation cover, spatial variability.