

Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России

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

¹ *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*

E-mail: muzylev@iwp.ru

² *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»*

Москва, 123242, Россия

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Описан способ оценки влагозапасов почвы, суммарного испарения и других составляющих водного и теплового балансов обширной территории с помощью физико-математической модели процессов влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой (LSM, Land Surface Model) при использовании спутниковых данных о состоянии подстилающей поверхности (ПП) и метеоусловиях. Параметрами модели являются характеристики почв и растительности, а входными переменными – метеорологические характеристики, значения которых определяются по данным наземных наблюдений или по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10. В число этих характеристик входят: нормализованный индекс вегетации NDVI, излучательная способность ПП E и три вида ее температуры – поверхностей почвы T_{sg} , растительности T_a и эффективной температуры ПП $T_{s,eff}$ или T_{ls} , проективное покрытие растительностью B , листовой индекс LAI, облачность и осадки. Описаны разработанные или усовершенствованные методы и технологии получения оценок названных характеристик путем тематической обработки данных измерений со спутников. Проведена проверка работоспособности этих технологий для исследуемой территории части Центрально-Черноземного региона России площадью 227300 км². Описаны разработанные способы использования в модели построенных спутниковых оценок. Представлены результаты расчета с помощью адаптированной к спутниковым данным модели величин влагозапасов почвы, суммарного испарения и других составляющих водного и теплового балансов исследуемой территории за сезоны вегетации 2009–2012 гг.

Ключевые слова: LS-модель, спутниковые данные, AVHRR, MODIS, SEVIRI, подстилающая поверхность, листовой индекс, температура, осадки, влагозапасы почвы, суммарное испарение

Введение

В настоящее время наиболее эффективный путь получения корректных оценок компонент водного баланса значительных по размерам территорий заключается в разработке методов физико-математического моделирования процессов взаимодействия поверхности суши с атмосферой. Основой подхода, нацеленного на раскрытие закономерностей этих процессов и на получение в качестве количественного результата оценок запасов воды в почве и суммарного испарения как основных воднобалансовых характеристик, является создание моделей вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности (ПП) с атмосферой (LS-моделей, Land Surface Model) (библиография и краткий обзор представлены, например, в нашей работе (Staritseva et al., 2014), см. также обзоры (Moehrlen, 1999; Pitman, 2003; Overgaard et al., 2006; Gowda et al., 2008)). Успешность реализации подобных моделей зависит от полноты их информационного обеспечения, корректности параметризаций процессов влаго- и теплопереноса, учета влияния неоднородности ПП. Введение в LS-модели данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников о характеристиках ПП и метеорологических характеристиках является важнейшим фактором эффективности такого моделирования для значительных по размерам территорий, особенно при недостатке данных

наземных наблюдений (Startseva et al., 2014). В настоящей работе при моделировании компонент водного и теплового балансов обширной территории за сезон вегетации использовались построенные по данным радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra и Aqua и SEVIRI/Meteosat-9, -10 оценки температуры ПП (ТПП) и ее излучательной способности E , нормализованного индекса вегетации NDVI, проективного покрытия растительностью B , листового индекса LAI, облачности и осадков. Исследования проводились на примере территории части Центрально-Черноземного региона (ЦЧР) России площадью 227300 км² с координатами 49°30'–54° с.ш. и 31°–43° в.д., находящейся в зоне лесостепи и включающей Курскую, Белгородскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области.

В рамках описанного подхода основными задачами работы являлись:

1. усовершенствование методов и технологий тематической обработки данных измерений названных сенсоров и построения оценок упомянутых величин для исследуемой территории;
2. усовершенствование версии LS-модели, адаптированной к полученным спутниковым оценкам характеристик растительности и метеорологических характеристик, в том числе разработка способов усвоения в модели этих оценок с учетом их пространственной изменчивости;
3. получение с помощью данной модели для сезонов вегетации 2009–2012 гг. оценок составляющих водного и теплового балансов исследуемого региона, которые представляют конечные результаты расчетов.

Краткое описание LS-модели и методов оценки характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по данным ИСЗ

Усовершенствованная в работе LS-модель (модель вертикального влаго- и теплопереноса в системе “почва – растительность – атмосфера”) для вегетационного периода пригодна для воспроизведения распределений влажности и температуры почвы по глубине в их динамике, тепло- и влагосодержания W деятельного слоя почвы, испарения с голой почвы и транспирации влаги растительностью (суммарного испарения E_v), вертикальных потоков скрытого и явного тепла с ПП, температуры поверхностей почвы T_g и растительного покрова T_r , а также радиационной ТПП T_s . Детальное описание модели и результаты ее валидации приведены в работах (Музылев и др., 2002, 2005, 2010; Gelfan et al., 2012), здесь представим только ее важнейшие черты. Основу модели составляют уравнения влагопереноса и теплопроводности для деятельного слоя почвы с граничными условиями в виде потоков влаги и тепла на верхней и нижней границах этого слоя и на поверхности растительного покрова. Испарение с поверхности почвы и транспирация определяются с помощью полуэмпирических т.н. bulk-формул. Температуры T_g и T_r находятся из уравнений теплового баланса, соответственно, для почвы и растительного покрова, в пренебрежении теплосодержанием последнего. Радиационная ТПП T_s рассчитывается по остаточному члену уравнения для длинноволновой части радиационного

баланса, включающего противоизлучение атмосферы. Входными переменными модели являются температура, влажность воздуха и атмосферное давление, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация, значения которых определяются по данным стандартных сетевых срочных (трехчасовых) метеорологических наблюдений. Начальные условия для уравнений влагопереноса и теплопроводности задаются на момент начала вегетации по измерениям профилей влажности и температуры почвы под различными культурами на 48 агрометеорологических станциях, находящихся в исследуемом регионе. Различия свойств ПП и метеоусловий учитываются в модели путем представления характеристик почв и растительности в качестве параметров, а метеорологических характеристик – в качестве входных переменных при определении значений всех этих величин по данным измерений на агрометеорологических станциях и спутниковой информации. Использование в LS-модели оценок указанных параметров и переменных по спутниковым данным повышает точность расчетов составляющих водного и теплового балансов обширных территорий, а также позволяет построить пространственные распределения их значений. Как отмечалось во Введении, к данным величинам относятся NDVI, E, B, LAI, осадки и спутниковые аналоги температур T_s , T_g и T_f – ТПП $T_{s,eff}$ (эффективная) и T_{ls} и температуры поверхности почвы T_{sg} и воздуха у поверхности растительного покрова T_a , принимаемая за температуру этой поверхности.

Для получения оценок названных характеристик по данным AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и Aqua и SEVIRI/Meteosat-9, -10 были разработаны новые или усовершенствованы существовавшие технологии их тематической обработки, описанные в работах (Музылев и др., 2002, 2005, 2010, 2013; Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010 а,б; Волкова, 2013, 2014). Все технологии были адаптированы к территории ЦЧР. По данным AVHRR строились оценки NDVI, E, B, LAI и температур T_a , T_{sg} , $T_{s,eff}$. Проективное покрытие растительностью оценивалось по данным об NDVI:

$$B = (NDVI - NDVI_g) / (NDVI_v - NDVI_g),$$

где $NDVI_v$ и $NDVI_g$ – вегетационные индексы для растительности и голой почвы, принимавшиеся за максимальное и минимальное значения NDVI в пределах пиксела. Значения LAI для разных типов культур определялись по эмпирическим зависимостям от NDVI для условий степи: $LAI = -2,5 \times \ln(1,2 - 2 \times NDVI)$ для сельскохозяйственных культур (Biftu, Gan, 2001) и $LAI = NDVI \times 1,71 + 0,48$ для травянистой растительности (Biospheric Aspects, 1993). Оценки T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ для исследуемой территории за разные даты сезонов 2009–2012 гг. были получены при использовании регрессионных алгоритмов, уточненных за счет увеличения объема обучающих выборок. Точность определения T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ по данным AVHRR оценивалась путем сравнения с данными наблюдений на агрометеорологических станциях за сроки, наиболее близкие к моменту пролета спутника. Среднеквадратические отклонения (СКО) для T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ в названные сезоны составили, соответственно, 2,1–2,7; 3,6–4,9 и 2,3–3,6°C. Значения T_{ls} , E, NDVI и LAI за те же сезоны вегетации строились и по информации MODIS с помощью данных, загружавшихся

с веб-сайта LP DAAC (NASA) <https://lpdaac.usgs.gov>. Пространственное разрешение для величин T_{ls} составляло 4,8 и 1 км, а для определявшихся раз в 8 дней величин NDVI и LAI – 1 км. Корректность оценок T_{ls} проверялась путем сравнения с данными синхронных наземных агрометеорологических наблюдений, а также с оценками $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_{ls} (SEVIRI). Для подавляющего числа измерений оценки T_{ls} (MODIS) с меньшим разрешением оказались достовернее, чем с большим. СКО оценок T_{ls} (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеорологических станциях, находились в пределах 2,5–3,5°C, различия оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR) составляли 2,0–3,5, а оценок T_{ls} (MODIS) и T_{ls} (SEVIRI) – 3,0–3,5°C. Расхождения между последними величинами, по-видимому, обусловлены разным пространственным разрешением и несинхронностью измерений, а также использованием различных процедур совмещения пар данных оценок.

По данным SEVIRI были получены оценки T_{ls} , T_a , E, LAI, В и осадков. Оценки T_{ls} и E для светлого и темного времени суток строились с помощью описанного в работах (Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010 а, б) оригинального метода, заключающегося в последовательном применении локального алгоритма “расщепленного окна прозрачности” (Wan, Dozier, 1996; Успенский, Щербина, 1996; Uspensky, Shcherbina, 1998) и метода “двух температур” (Faysash, Smith, 2000). В методе используются данные SEVIRI в ИК каналах №№ 9 и 10 (10,8 и 12 мкм) при отсутствии облачности за три последовательных срока (например, за 11⁰⁰, 12⁰⁰, 13⁰⁰ UTC). При этом не требуется задания с высокой точностью начальных значений E в этих каналах. Анализ адекватности оценок T_{ls} проводился путем сопоставления с аналогичными синхронными оценками, полученными по данным SEVIRI в LSA SAF (Прикладном центре анализа спутниковых данных о поверхности Земли, Лиссабон, Португалия) для летних месяцев 2009–2012 гг. – расхождения их значений не превышали 2°C, что с учетом погрешности оценок T_{ls} (LSA SAF) в 1,5–2,5°C можно считать приемлемым. Корректность оценок T_{ls} (SEVIRI) для исследуемой территории была подтверждена также результатами сравнения с оценками $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_{ls} (MODIS) – расхождения значений $T_{s,eff}$ (AVHRR) и T_{ls} (SEVIRI) для большинства сроков наблюдений не превышали СКО оценок $T_{s,eff}$ (AVHRR), а СКО T_{ls} (SEVIRI) от T_{ls} (MODIS) для рассматривавшихся сезонов вегетации, как отмечалось выше, не превышало 3,5°C. Кроме того, сравнительный анализ полей T_{ls} (SEVIRI) и T_{ls} (MODIS) за конкретные сроки измерений 2010 г. показал (Музылев и др., 2013), что они имеют схожую пространственную структуру; а разность T_{ls} (MODIS) – T_{ls} (SEVIRI) для большинства пикселей лежит в указанных выше пределах. Значения температуры воздуха на уровне растительности T_a (SEVIRI) в любое время суток, принимавшейся за температуру ее поверхности, определялись с помощью нового метода оценивания этой величины по данным SEVIRI (Успенский и др., 2011), заключающегося в построении линейной регрессионной связи между спутниковыми оценками T_{ls} и результатами наземных измерений T_a с учетом данных о времени суток, зенитном угле Солнца, высотах земной поверхности и использовании этой связи для получения оценок T_a . СКО спутниковых оценок T_a от данных синхронных срочных наземных наблюдений на сети агрометеорологических станций исследуемого региона за сезоны вегетации

2009–2012 гг. находились в пределах 1,8–2,9°C, что может считаться вполне приемлемым. Распределения значений T_a (AVHRR) и T_a (SEVIRI) по площади исследуемого региона и результаты их сравнения для одного из дней сезона вегетации 2012 г. представлены на *рис. 1 б–г*.

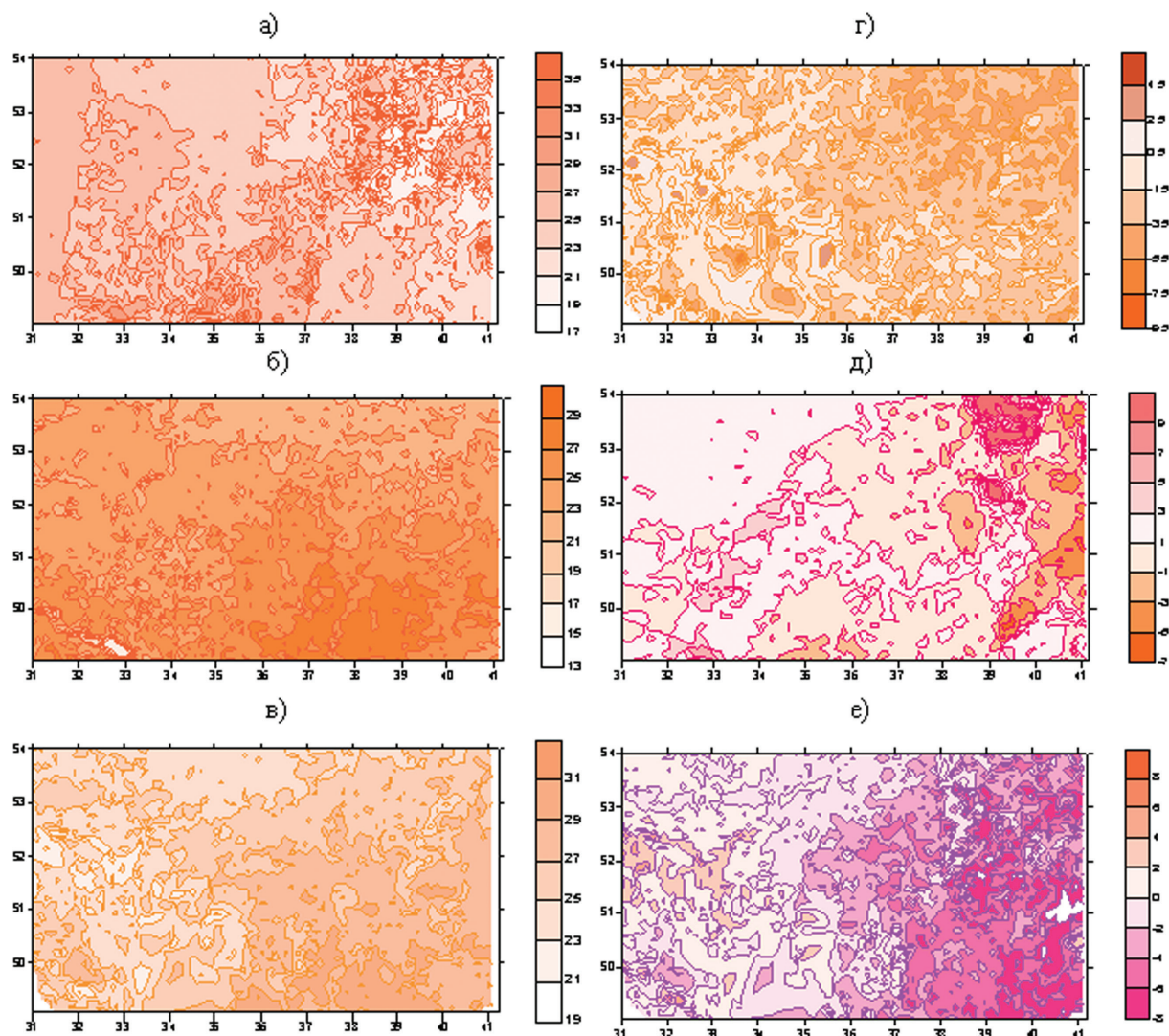


Рис. 1. Температура поверхности растительного покрова, рассчитанная по модели: а – по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений T_p , б – определенная по данным AVHRR T_a (AVHRR), в – SEVIRI T_a (SEVIRI), г – разности T_a (AVHRR) - T_a (SEVIRI), д – T_f - T_a (AVHRR), е – T_f - T_a (SEVIRI), для территории части ЦЧР площадью 227300 км² на 15 ч местного времени 30.07.2012

Расхождения этих значений не превышают величины погрешности оценки T_a по данным AVHRR. Оценки LAI и В по информации SEVIRI для рассматриваемой территории были получены в LSA SAF при обработке данных измерений в каналах 0,6; 0,8 и 1,6 мкм в отсутствие облачности. Достоверность оценок В и LAI обеспечивалась привлечением данных в канале 1,6 мкм и модификацией разработанной ранее процедуры определения В. При диапазонах изменчивости В (0–100%) и LAI (0–10) погрешности определения В и LAI не превышали 10 и 15%, соответственно. Примеры сравнения временных ходов LAI за сезон вегетации 2012 г., построенных по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и по наземным данным для двух агрометеорологических станций региона, представлены на *рис. 2 а,б*.

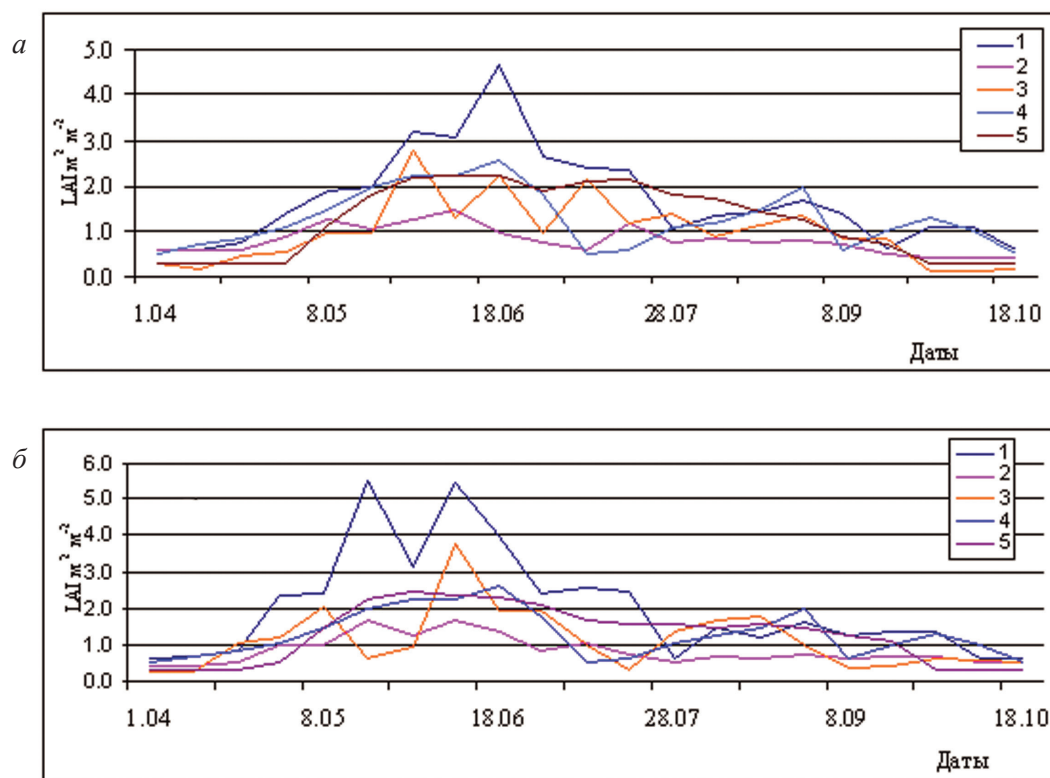


Рис. 2. Временные ходы LAI за сезон вегетации 2012 г. на агрометеорологических станциях Обоянь (а) и Рыльск (б), построенные по данным AVHRR для зерновых (1) и трав (2), MODIS (3), SEVIRI (5) и по наземным данным (4)

Оценки суточных и месячных сумм осадков для исследуемой территории за сезон вегетации 2009–2012 гг. были получены с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации ее типов в круглосуточном режиме в течение всего года, а также выделения зон осадков и определения их мгновенной максимальной в границах пиксела интенсивности по данным измерений в 5-и каналах AVHRR и 11-и каналах SEVIRI (Волкова, Успенский 2007, 2010). Валидация методики производилась с использованием данных наблюдений за количеством выпавших в течение суток осадков на 48 агрометеорологических станциях региона. Вероятность детектирования по спутниковым данным зон осадков, соответствующих фактическим, при сопоставлении с данными наземных наблюдений на метеостанциях составила 70–80% (Волкова, 2013). Построенные по данным AVHRR и SEVIRI суточные и месячные суммы осадков неплохо согласуются между собой и с данными наземных наблюдений, хотя и представляют более сглаженные по сравнению с последними оценки (Волкова, 2014). Расхождения существуют для ряда локальных максимумов, спутниковые оценки осадков для которых заметно меньше наземных, что может быть обусловлено разными пространственными масштабами площадных спутниковых и точечных наземных оценок. В качестве примера на рис. 3 представлены пространственные распределения осадков на одну из дат сезона вегетации 2012 г., построенные с помощью КПМ, и результаты наземных оценок суточных сумм осадков. Визуальный анализ показывает удовлетворительное соответствие обоих видов оценок.

Некоторое пространственное смещение максимумов и минимумов осадков, определенных по измерениям со спутников, относительно наземных данных объясняется несоответствием местоположения облаков на спутниковом изображении и в действительности при больших углах спутникового визирования и значительных высотах верхней границы облаков. Полученные результаты оценок осадков по данным ИСЗ могут рассматриваться как равноценная замена данным наземных метеорологических наблюдений.

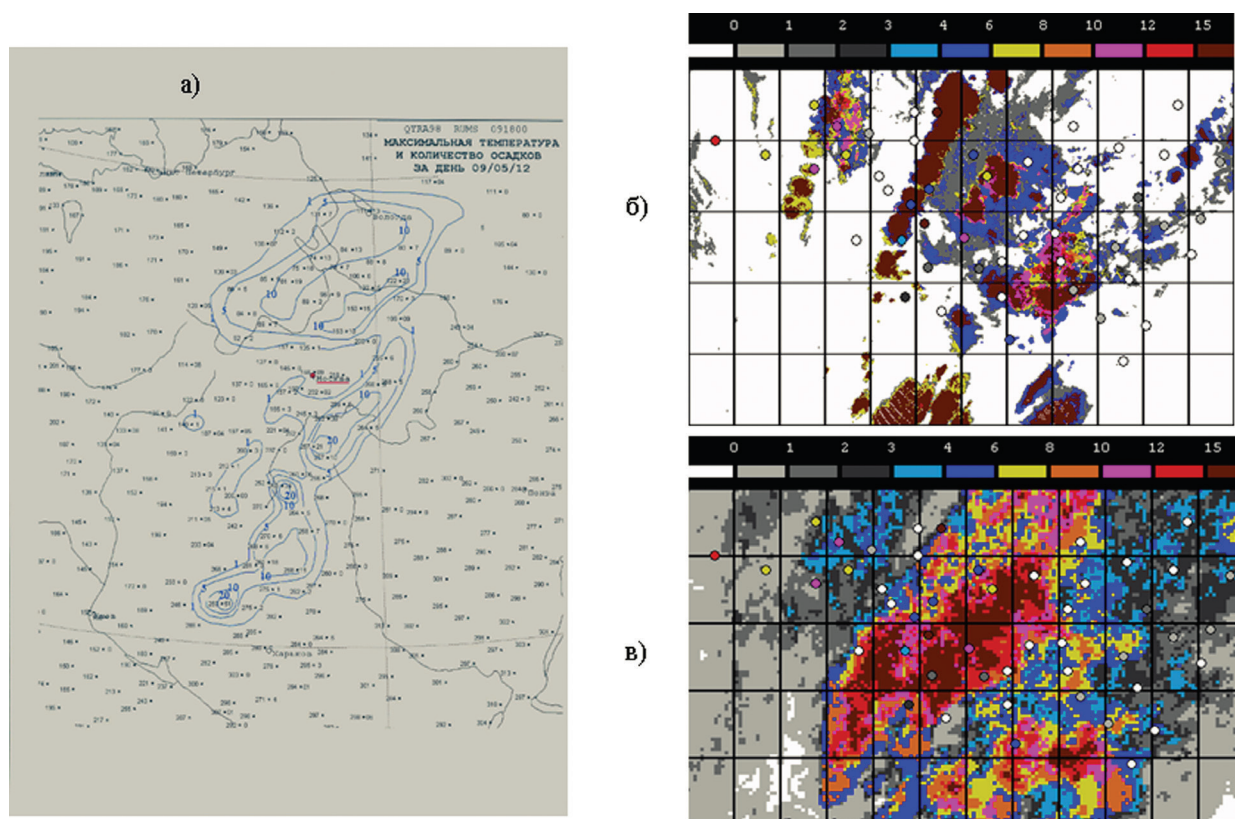


Рис. 3. Сравнение суточных сумм осадков (мм) за 9 мая 2012 г., определенных по данным наземных наблюдений (а) и спутниковым данным AVHRR/NOAA (б) и SEVIRI/Meteosat-9 (в), для территории части ЦЧР с координатами 49–54° с.ш., 31–43° в.д. (Кружочками отмечено местоположение агрометеорологических станций. Линии сетки проведены через 1°)

Разработка способов использования в модели спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик для расчетов составляющих водного и теплового балансов исследуемой территории

Определение значений параметров и входных переменных модели, в том числе построение по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI оценок перечисленных характеристик растительности и метеорологических характеристик, а также расчеты величин суммарного испарения, влагосодержания почвы и других составляющих водного и теплового балансов и ТПП производились в узлах регулярной вычислительной сетки модели, накладывавшейся на карту исследуемого региона, с размером ячейки 3×3 пиксела радиометра

AVHRR ($\sim 7 \times 5 \text{ км}^2$). Поскольку размер пиксела для ИК каналов AVHRR составлял $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе, а разрешение для аналогичных каналов MODIS – 1 и $4,8 \text{ км}$ и для таких же каналов SEVIRI – $0,05^\circ$ по широте и $0,06^\circ$ по долготе, с помощью специально разработанных программ было произведено совмещение данных сеток.

Для использования в модели спутниковых оценок характеристик растительности, ТПП и осадков с учетом их распределений по площади исследуемой территории были предложены и реализованы процедуры:

- замена определенных по данным наземных наблюдений значений параметров модели LAI и В на их оценки по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI (Музылев и др. 2010, 2012);

- ввод в модель в качестве входных переменных значений $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_a , определенных по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI, вместо их оценок по наземным данным (Gelfan et al. 2012; Музылев и др. 2012, 2013);

- ввод в модель также в качестве входных переменных величин осадков за сутки и по срокам, рассчитанных по данным AVHRR и SEVIRI, вместо результатов их измерений на агрометеорологических станциях региона (Startseva et al., 2014);

- учет в модели пространственной неоднородности полей оценок LAI, В, $T_{s,eff}$, T_{ls} , T_a и осадков, построенных по спутниковым данным AVHRR, MODIS и SEVIRI, и оценок осадков, температуры и влажности воздуха, являющихся результатом интерполяции данных стандартных наземных наблюдений, путем создания алгоритмов и программ ввода в модель значений всех указанных величин в каждом узле ее вычислительной сетки.

Работоспособность первой процедуры была подтверждена при сравнении:

1. временных ходов LAI за сезон вегетации, построенных по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и по наземным данным для нескольких агрометеорологических станций (рис. 2а, б);
2. результатов расчета по модели влагозапасов почвы W и суммарного испарения Ev при определении значений LAI по данным названных сенсоров и наземных измерений (рис. 4а и 5а, соответственно);
3. рассчитанных по модели значений ТПП T_s и поверхности растительного покрова T_f с их спутниковыми аналогами $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_a и данными наземных наблюдений (рис. 1а–в, д, е и рис. 6а, б). Для большинства дат различия значений LAI не превышают ошибки его оценки по данным SEVIRI в 15% (см. выше); расхождения значений W и Ev, рассчитанных для всех вариантов оценки LAI и фактических, находятся в допустимых пределах; разности значений $T_{s,eff}$ и T_s , T_{ls} и T_s , T_a и T_f и измеренных температур не превышают СКО оценок $T_{s,eff}$ и T_a по данным AVHRR.

Второй процедурой использования в модели данных ДЗЗ является ввод в нее в качестве переменных спутниковых оценок ТПП вместо аналогичных наземных. Для получения достоверных результатов моделирования при использовании таких оценок, построенных по данным AVHRR и MODIS, которые получают дважды в сутки для каждого из ИСЗ серии NOAA и EOS Terra или Aqua, требуется согласование моментов времени

съемки со спутника и наземных наблюдений. В противном случае, то есть при использовании разновременных наземных и спутниковых данных, из-за различий значений температуры, обусловленных ее внутрисуточным ходом, расхождения оценок влагосодержания почвы, суммарного испарения и других составляющих водного и теплового балансов могут быть значительными. При использовании в модели оценок ТПП по данным SEVIRI погрешность расчета искомых составляющих балансов оказывается меньшей, чем при использовании данных AVHRR и MODIS. Однако при использовании данных SEVIRI, получаемых раз в 15 минут и осредняемых по трехчасовым интервалам, возникают определенные затруднения, обусловленные сложностью отыскания для обширной территории безоблачных периодов большой продолжительности, что обеспечивало бы возможность формирования длинного многодневного ряда непрерывных внутрисуточных измерений.

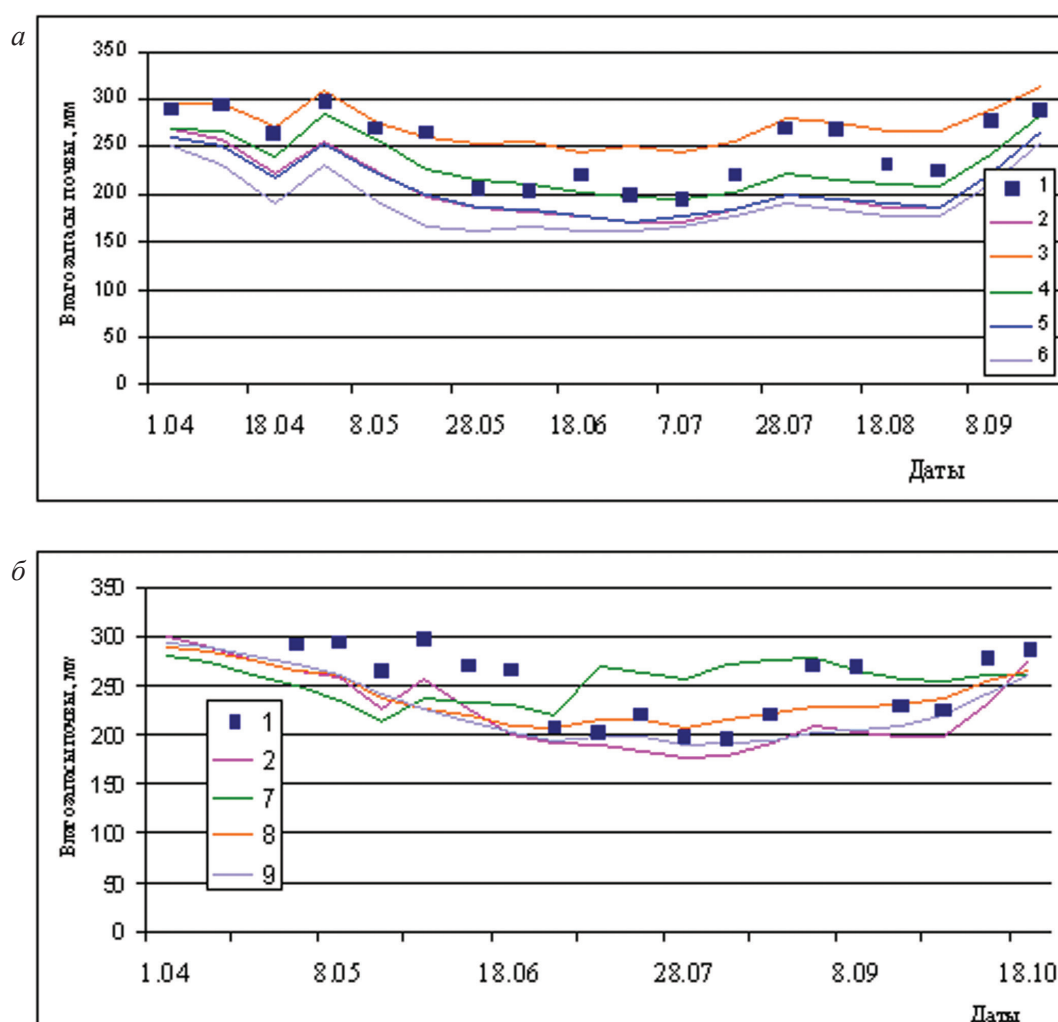


Рис. 4. Влагозапасы почвы W за пентаду для сезона вегетации 2012 г., измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1) и рассчитанные по модели для агрометеорологической станции Рыльск: при оценках осадков по наземным данным (2–6) и оценках LAI по данным AVHRR для зерновых (2) и травяных (3) культур, по данным MODIS (4), SEVIRI (6) и наземным данным (5); при оценках осадков по спутниковым данным AVHRR (за сутки) (7) и SEVIRI (за сутки) (8) и за три часа (9)

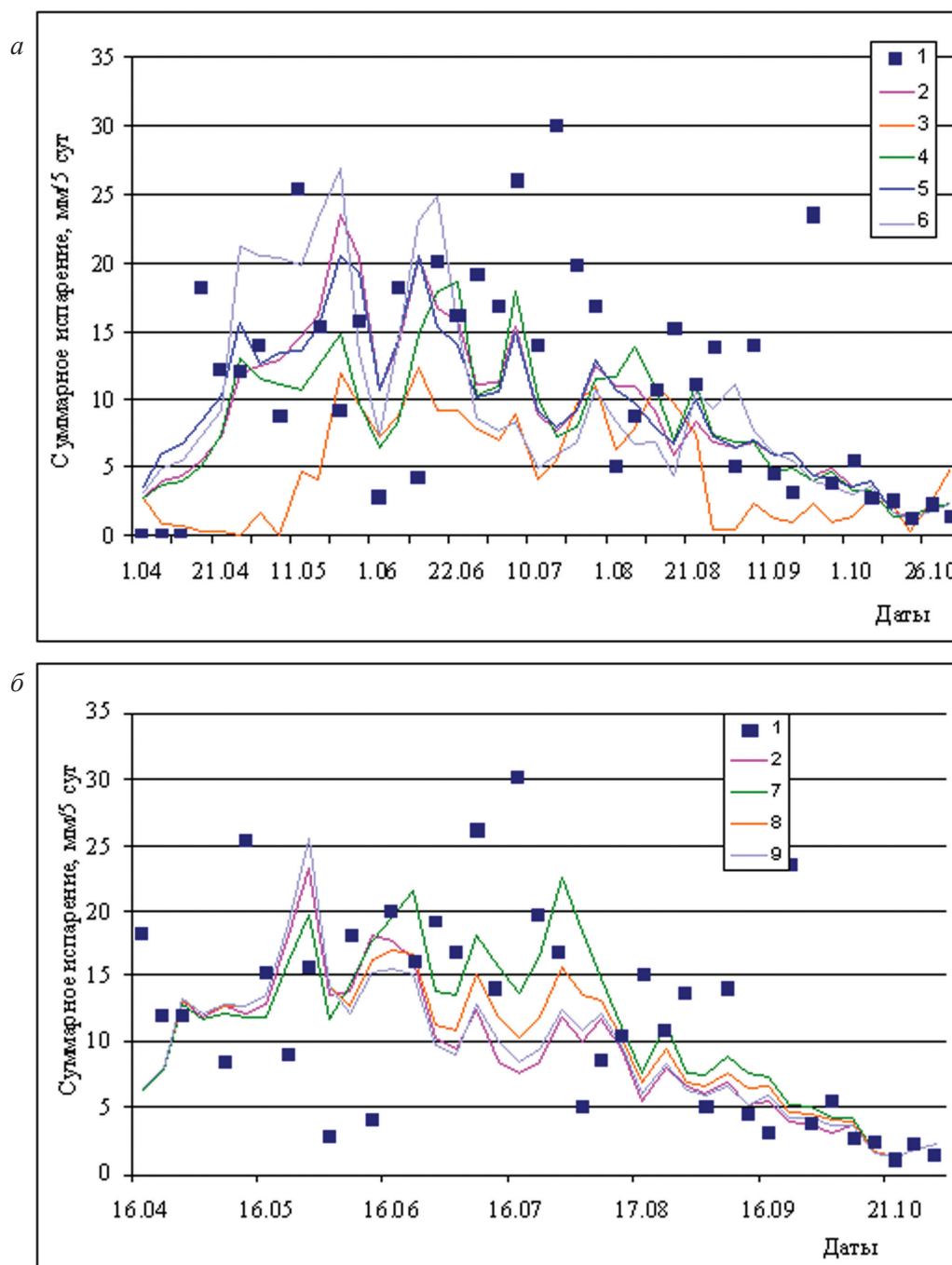


Рис. 5. Значения суммарного испарения E_t за пентаду для сезона вегетации 2012 г., измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1) и рассчитанные по модели для агрометеорологической станции Рыльск: при оценках осадков по наземным данным (2–6) и оценках LAI по данным AVHRR для зерновых (2) и травяных (3) культур, по данным MODIS (4), SEVIRI (6) и наземным данным (5); при оценках осадков по спутниковым данным AVHRR (за сутки) (7) и SEVIRI (за сутки) (8) и за три часа (9)

Сравнение рассчитанных по модели значений радиационной ТПП T_s и температуры поверхности растительного покрова T_f со значениями их определенных по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI аналогов – $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_a , проводившееся для нескольких групп безоблачных дней каждого из сезонов вегетации 2009–2012 гг., являлось косвенной проверкой допустимости описанных выше замен наземных оценок LAI, В и температур на спутниковые. Для большинства дней каждого из этих сезонов разности $T_s - T_{s,eff}$, $T_s - T_{ls}$, $T_f - T_a$ не пре-

вышли значений погрешностей оценки $T_{s,eff}$ и T_a по данным AVHRR. Примеры распределения по площади исследуемого региона значений $T_f(MODEL)$, $T_a(AVHRR)$, $T_a(SEVIRI)$ и их разностей на одну из дат сезонов вегетации 2012 г. представлены на *рис. 1а–е*. На *рис. 6* приведены временные ходы за сезон вегетации 2012 г. температур $T_{ls}(SEVIRI)$ и $T_a(SEVIRI)$, а также $T_s(MODEL)$ и $T_f(MODEL)$, рассчитанных при использовании данных наземных наблюдений на одной из агрометеорологических станций региона. Наибольшие расхождения модельных и спутниковых оценок ТТП за отдельные сроки отмечены 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. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования спутниковых оценок ТТП при расчетах с помощью модели составляющих водного баланса обширной территории. При этом эффективность производимых расчетов будет тем выше, чем больше временная продолжительность ряда непрерывных спутниковых измерений.

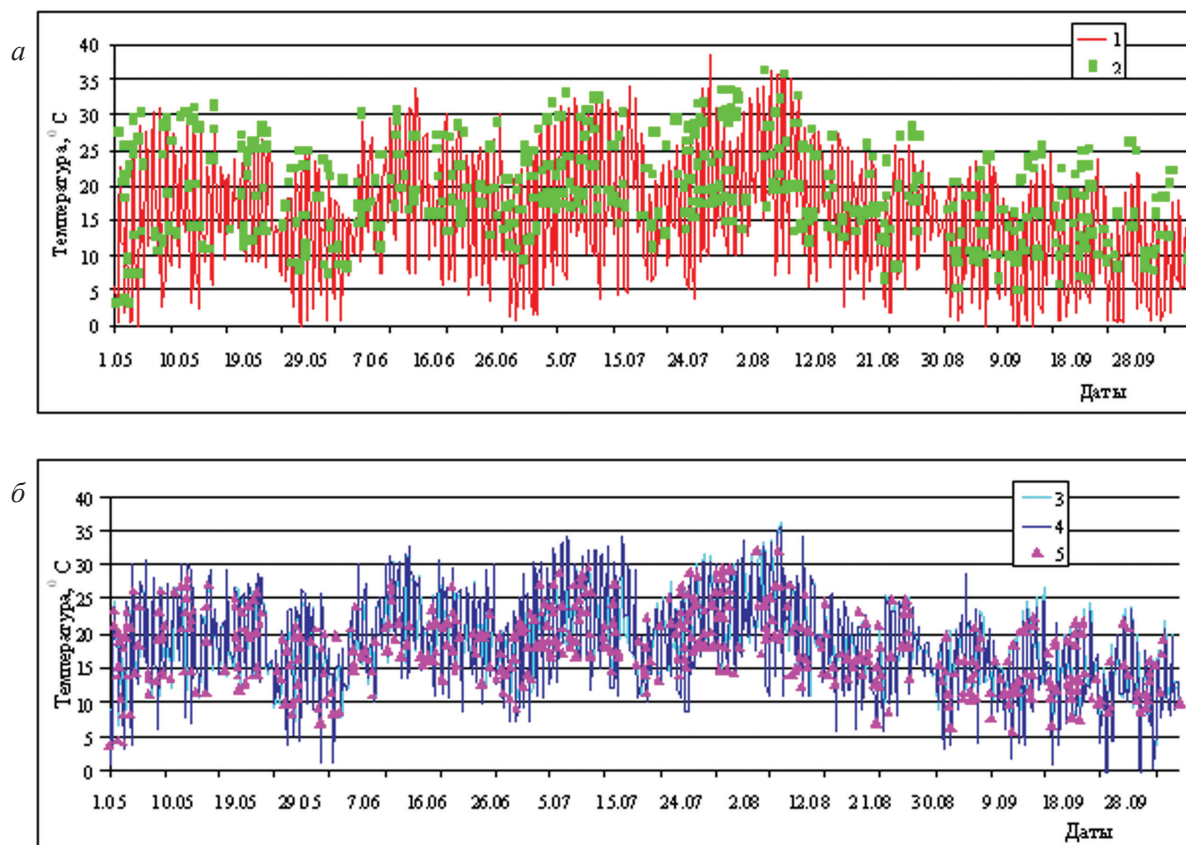


Рис. 6. Радиационная температура подстилающей поверхности $T_s(MODEL)$ (1) и $T_{ls}(SEVIRI)$ (2) и температура поверхности растительного покрова $T_f(MODEL)$ (3) и $T_a(SEVIRI)$ (5), рассчитанные по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений на агрометеорологической станции Обоянь (1), (3) и определенные поданным SEVIRI (2), (5) для сезона вегетации 2012 г. (4) – измеренная температура воздуха

При разработке процедуры использования в модели спутниковых оценок осадков за вегетационный период созданы алгоритмы и программы перехода от оценки интенсивности

осадков к оценке их суточных величин (Волкова, 2014). Реализация такого перехода требует проверки корректности полученных оценок на каждом временном шаге, включающей сравнение площадных распределений полей осадков (их трехчасовых, суточных и месячных сумм), построенных по данным AVHRR и SEVIRI и путем интерполяции данных сетевых наземных наблюдений (Startseva et al., 2014). Расчеты составляющих водного и теплового балансов исследуемого региона при использовании спутниковых оценок осадков в качестве входной переменной модели были проведены для сезонов вегетации 2010–2012 гг. На *рис. 4б* и *рис. 5б* представлены, соответственно, результаты моделирования влагозапасов почвы и суммарного испарения за сезон вегетации 2012 г. для агрометеорологической станции Рыльск при использовании в расчетах величин осадков, определявшихся по данным радиометров AVHRR и SEVIRI и по данным наземных наблюдений. Эти результаты показывают, что расхождения значений как влагозапасов, так и суммарного испарения находятся в допустимых пределах.

Для учета пространственной неоднородности полей спутниковых оценок ТПП, LAI, В и осадков были разработаны алгоритмы ввода этих оценок в модель в узлах ее вычислительной сетки. Примеры распределений по площади исследуемого региона спутниковых оценок T_a и осадков на отдельные даты сезона вегетации 2012 г. приведены выше (*рис. 1б, в* и *рис. 3а–в*). Аналогичные распределения построены и для значений остальных рассматривавшихся характеристик растительности и метеорологических характеристик. Для тех узлов, где в какие-либо сроки спутниковые оценки ТПП и осадков отсутствовали, значения температуры и влажности воздуха, а также интенсивности осадков рассчитывались с помощью процедуры интерполяции IWDМ (Inverse weighted distance method) данных стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

Конечным результатом моделирования являются оценки составляющих водного и теплового балансов исследуемой территории – суммарного испарения E_v , влагозапасов почвы W , инфильтрации воды в почву, потока влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие горизонты, потоков скрытого LE и явного тепла, а также радиационной ТПП T_s , температуры поверхности растительного покрова T_f и голой почвы T_g и распределений температуры и влажности почвы по глубине. Расчеты всех этих величин выполнены для территории части ЦЧР площадью 227300 км² для сезонов вегетации 2009–2012 гг. Корректность полученных оценок W и E_v подтверждена результатами сравнения с данными измерений этих величин на агрометеорологических станциях, а также с их значениями, рассчитанными по модели при всех рассмотренных вариантах определения LAI, В, $T_{s,eff}$, T_{ls} , T_a и осадков по спутниковой информации. Расхождения значений E_v за пентаду при всех вариантах расчетов находятся в пределах нескольких мм (*рис. 4а, б; рис. 5а, б*), что не превышает общепринятой величины ошибки определения величины E_v (20–25%). Отдельные отскоки точек графика E_v могут быть обусловлены кратковременным перегревом мелких участков ПП во второй половине дня, резким возрастанием транспирации при выпадении локальных ливней большой интенсивности, неточностью оценки LAI, ТПП и осадков. Погрешность оценки W для подавляющего числа сроков наблюдений сезона вегетации составляет 10–15% (*рис. 4а, б; рис. 5а, б*), что также считается нормальным.

Все рассчитанные с помощью модели величины – E_v , W , LE и другие составляющие водного и теплового балансов исследуемого региона – представлены в виде распределений по его площади. В качестве примеров подобных распределений на *рис. 7а-в* изображены, соответственно, поля значений потоков скрытого тепла за сутки LE и запасов влаги в метровом слое почвы W , рассчитанных по модели с использованием оценок суточных сумм осадков по данным наземных измерений и по данным SEVIRI, а также их разностей для одного из дней сезона вегетации 2012 г. Как видно из рисунков, погрешности представленных оценок LE и W находятся в указанных выше пределах.

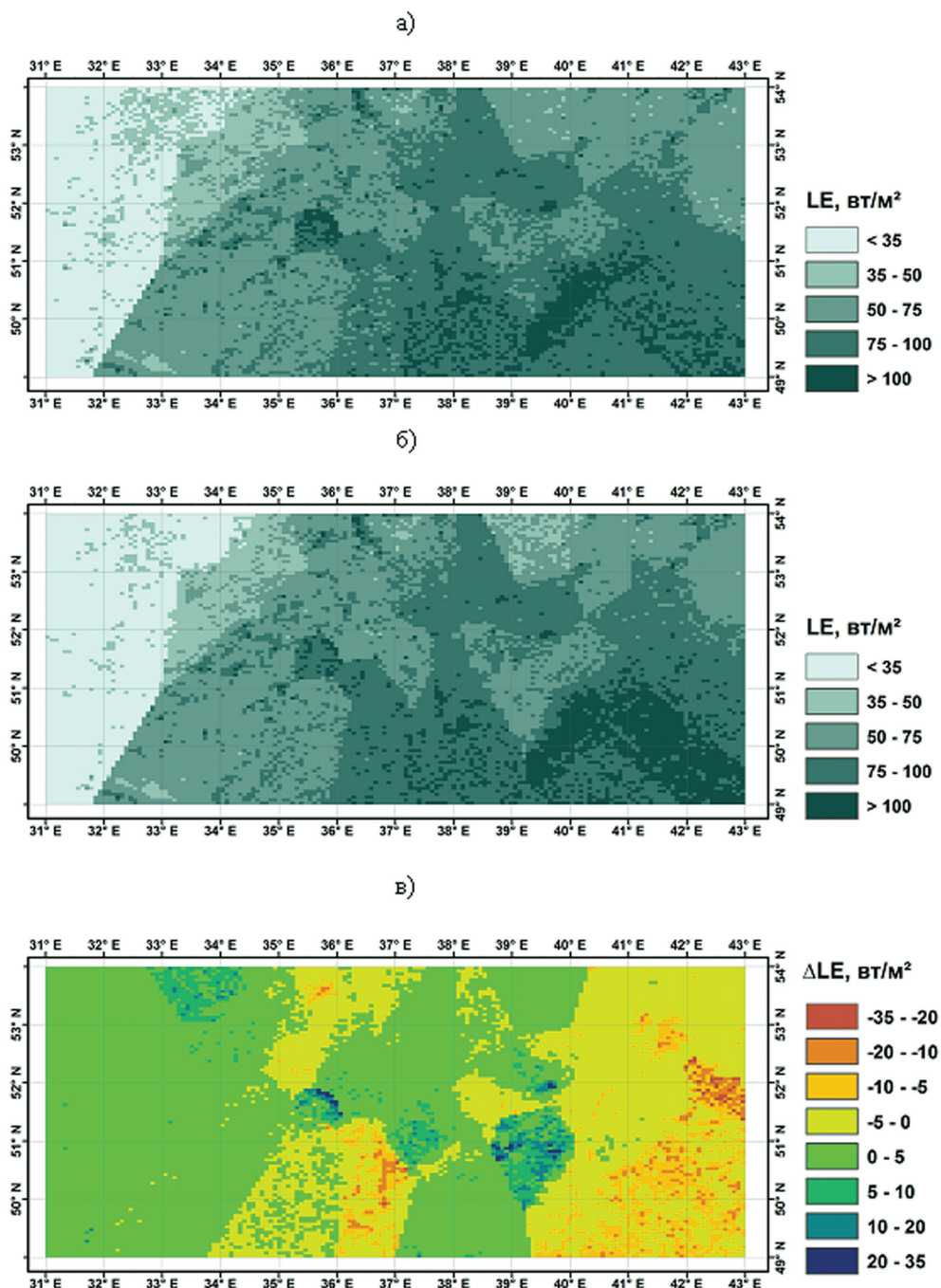


Рис. 7. Потоки скрытого тепла за сутки LE ($Вт/м^2$)), рассчитанные по модели с использованием оценок суточных сумм осадков, полученных по данным наземных измерений (а) и по данным SEVIRI (б), и их разность (в) для исследуемой территории площадью 227300 км^2 на 15 мая 2012 г.

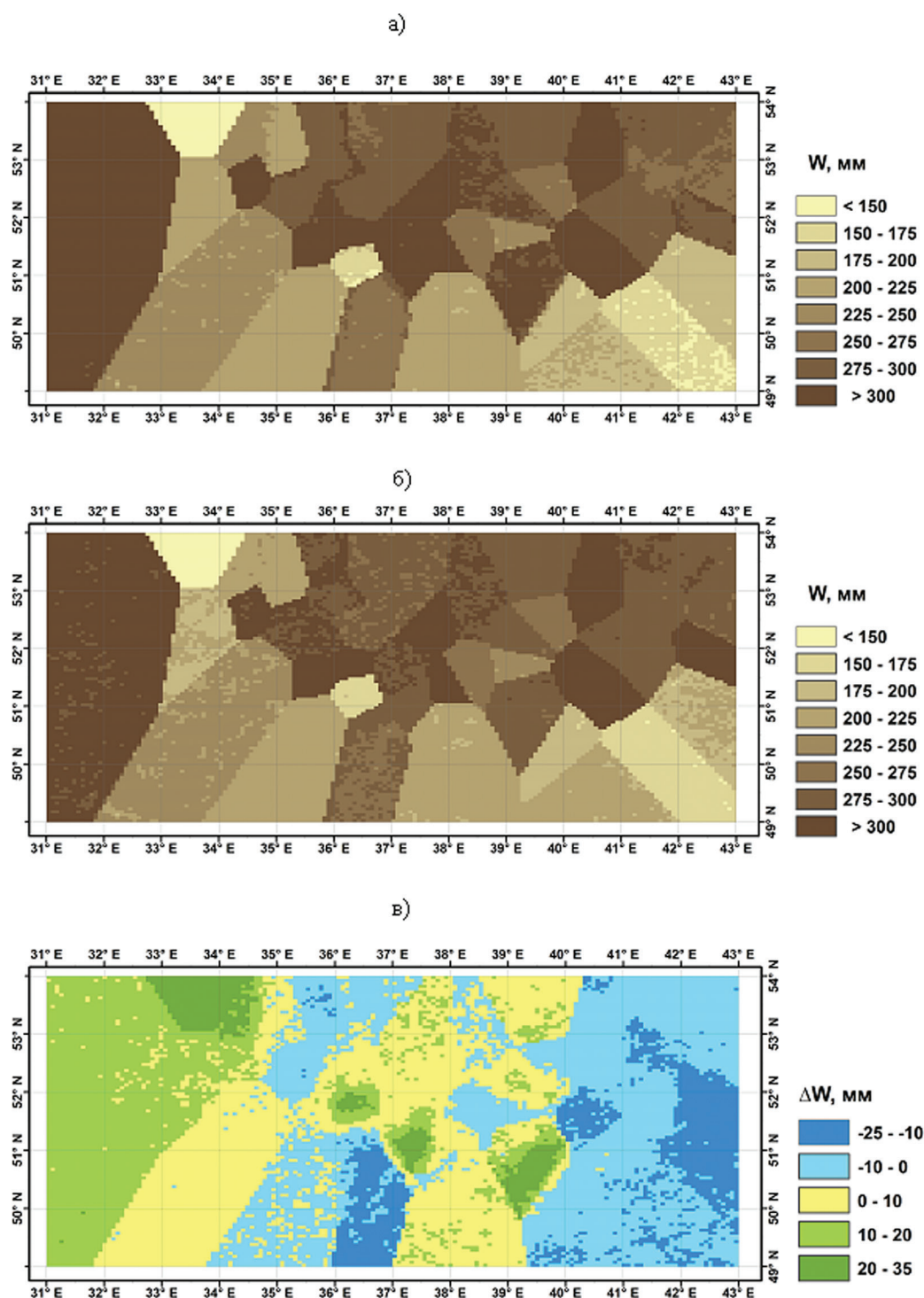


Рис. 8. Влагозапасы почвы W (мм), рассчитанные по модели с использованием оценок суточных сумм осадков, полученных по данным наземных измерений (а) и по данным SEVIRI (б), и их разность (в) для исследуемой территории площадью 227300 км² на 15 мая 2012 г.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что использование в разработанной LS-модели спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик делает возможным построение пространственных полей суммарного испарения, влагосодержания почвы и других составляющих водного и теплового балансов значительной по площади покрытой растительностью территории.

Заключение

Основной результат настоящей работы – предложенный метод описания полей составляющих водного и теплового балансов покрытых растительностью территорий, в том числе характеризующихся недостатком наземных наблюдений. Основу метода представляет разработанная для территорий регионального масштаба физико-математическая модель влаго- и теплообмена участков суши с атмосферой, адаптированная к спутниковым данным о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. При создании этого метода и его численной реализации получены следующие результаты.

- Разработаны новые или усовершенствованы существовавшие методы и технологии тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10 и построения оценок характеристик растительного покрова, ТПП и осадков. Все технологии адаптированы к исследуемой территории части ЦЧР.
- Разработаны процедуры использования в модели спутниковых оценок названных характеристик при учете пространственной неоднородности полей их значений. Произведенные проверки функционирования модели подтвердили корректность применения данных процедур.
- С помощью разработанной модели выполнены расчеты запасов почвенной влаги суммарного испарения и других составляющих водного и теплового балансов территории части Центрально-Черноземного региона России площадью 227300 км² за сезоны вегетации 2009–2012 гг. Значения всех рассчитанных величин представлены в виде распределений по площади исследуемого региона, при этом погрешности их оценки находятся в допустимых пределах.

Литература

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66–74.
2. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 163–177.
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., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ METEOSAT-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16–22.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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 мо-

- делировании составляющих водного и теплового балансов обширных территорий сельскохозяйственного назначения. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 258–268.
9. Мухомов Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Моделирование водного режима территории крупного сельскохозяйственного региона с использованием данных измерений геостационарных метеорологических спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 53–65.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Соловьев В.И., Успенский С.А., Успенский А.Б. 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.
 13. 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, Июнь 2011. СПб: Изд-во СПбГУ. С. 37–38.
 14. 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.
 15. 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. Vol. 244. P. 137–156.
 16. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC). Report № 27. Ed. by BAHC Core Project Office. Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Germany. 1993. 103 p.
 17. 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. Vol. 39. P. 971–982.
 18. 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. Chapter 6. P. 141–176.
 19. Gowda P.H., Chavez J.L., Colaizzi P.D., Evette S.R., Howell T.A., Tolk J.A. ET Mapping for Agricultural Water Management: Present Status and Challenges // Irrigation Science. 2008. Vol. 26. P.223–237. doi:10.1007/s00271-007-0088-6.
 20. Moehrlen C. Literature Review of Current Used SVAT Models // Internal Report 04-99. 1999. Cork: University College Cork, Department of Civil & Environmental Engineering.
 21. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B. Land-Surface Modeling in Hydrological Perspective – a Review // Biogeosciences. 2006.Vol. 3. P. 229–241. doi:10.5194/bg-3-229-2006.
 22. Pitman A.J. The Evolution of, and Revolution In, Land Surface Schemes Designed for Climate Models // International Journal of Climatology. 2003. Vol.23. P.479–510. doi:10.1002/joc.893.
 23. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data.// International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, No. 15. P. 5775–5799.
 24. Uspensky A.B., Shcherbina G.I. Derivation of land surface temperatures and emissivities from satellite IR window measurements // Advances in Space Research. 1998. Vol. 21. No. 3. P. 433–437.
 25. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space. // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1996. Vol. 34. No. 4. P. 892–905.

Utilization of remote sensing data for modeling water and heat balance components of the Russian Central Black Earth Region territory

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

¹ Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia

E-mail: muzylev@aqua.laser.ru

² State Research Center of Space Hydrometeorology Planeta

Moscow 123242, Russia

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

A method has been developed for assessing soil water content, evapotranspiration and other water and heat balance components of a vast territory based on the physical-mathematical model of water and heat exchange of vegetation covered land areas with atmosphere (LSM, Land Surface Model) using satellite data on land surface and meteorological conditions. Soil and vegetation characteristics are considered to be the model parameters and meteorological characteristics are the input variables. Their values have been derived from ground-observed or AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra and Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10 data. These include three types of land surface temperatures (LST) (land-surface skin temperature T_{sg} , air foliage temperature T_a , and efficient radiation temperature $T_{s,eff}$ or T_{ls}), emissivity E , normalized difference vegetation index NDVI, vegetation cover fraction B , leaf area index LAI, cloudiness, and precipitation. The methods and technologies have been developed or refined to retrieve estimates of these characteristics by thematic processing of satellite data. The efficiency control of these technologies for the study area of the Russian Central Black Earth Region of 227,300 km² has been carried out. The techniques to assimilate satellite-derived estimates in the model have also been developed. Using the model adapted to the satellite data, there have been calculated soil water content, evapotranspiration and other components of water and heat balance of the study territory for 2009–2012 vegetation seasons.

Keywords: LS Model, satellite data, AVHRR, MODIS, SEVIRI, land surface, leaf area index, temperature, precipitation, soil water content, evapotranspiration

References

1. Volkova E.V., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova, osadkov i opasnykh yavleniy pogody po dannym radiometra AVHRR s MISZ serii NOAA kruglosutochno v avtomaticheskom regime (Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 66–74.
2. Volkova E.V., Opredelenie summ osadkov po dannym radiometrov SEVIRI/Meteosat-9,-10 and AVHRR/NOAA dlya Evropeyskoy territorii Rossii (Estimation of precipitation amount using SEVIRI/Meteosat-9 and AVHRR/NOAA data for the European territory of Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 163–177.
3. Volkova E.V., Uspensky A.B., Detektirovanie oblachnosti i opredelenie ee parametrov po sputnikovym dannym v svetloe vremya sutok (Detection of Clouds and Identification of Their Parameters from the Satellite Data in the Daytime), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, No. 12, pp. 5–20.
4. Volkova E.V., Uspensky A.B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova po dannym geostatsionarnogo MISZ METEOSAT-9 kruglosutochno v avtomaticheskom regime (Estimation of cloud cover parameters from METEOSAT-9 geostationary meteorological satellite data for day and night time), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 16–22.
5. Muzylev E.L., Uspensky A.B., Startseva Z.P., Volkova E.V., Modelirovanie gidrologicheskogo tsikla rechnykh vodosborov s ispolzovaniem sinhronnoy sputnikovoy informatsii vysokogo razresheniya (Simulation of Hydrological Cycle of River Basins Using Synchronous High Resolution Satellite Data), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2002, No. 5, pp. 68–82.
6. Muzylev E.L., Uspensky A.B., Volkova E.V., Startseva Z.P., Ispolzovanie sputnikovoy informatsii pri modelirovanii vertikalnogo teplo- i vlagopere nosa dlya rechnykh vodosborov, (Using Satellite Information for Modeling Heat and Moisture Transfer in River Watersheds), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 4, pp. 35–44.
7. Muzylev E.L., Uspensky A.B., Startseva Z.P., Volkova E.V., Kucharsky A.V., Modelirovanie sostavlyayushchih vodnogo i teplovogo balansov dlya rechnogo vodosbora s ispolzovaniem sputnikovyykh dannykh o harakteristikakh podstilayushchey poverhnosti, (Modeling water and heat balance components for the river basin using remote sensing data on underlying surface characteristics), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, No. 3, pp. 118–133.
8. Muzylev E.L., Uspensky A.B., Startseva Z.P., Gelfan A.N., Uspensky S.A., Alexandrovich M.V., Ispolzovanie sputnikovyykh dannykh o harakteristikakh podstilayushchey poverhnosti i snezhnogo pokrova pri modelirovanii sostavlyayushchih vodnogo i teplovogo balansov obshirnykh territoriy selskohozyaystvennogo naznacheniya,

- (Utilization of Satellite Data on Land Surface and Snow Cover Characteristics for Modeling Water and Heat Balance Components in Vast Areas of Agricultural Purpose), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 258–268.
9. Muzylev E.L., Uspensky A.B., Startseva Z.P., Volkova E.V., Kukharsky A.V., Uspensky S.A., Modelirovanie vodnogo regima territorii krupnogo selskohozyaystvennogo regiona s ispolzovaniem dannyh izmereniy geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov, (Simulation of the water regime of a vast agricultural region territory utilizing measurement data from geostationary meteorological satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 53–65.
 10. Solov'ev V.I., Uspensky S.A., Monitoring temperatury poverhnosti sushi po dannym geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya, (Monitoring of Land Surface Temperatures Based on Second Generation Geostationary Meteorological Satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 79–89.
 11. Solov'ev V.I., Uspenskii A.B., Uspenskii S.A., Opredelenie temperatury zemnoy poverhnosti po dannym izmereniy teplovogo izlucheniya s geostatsionarnykh meteorologicheskikh ISZ (Derivation of Land Surface Temperature Using Measurements of IR Radiances from Geostationary Meteorological Satellites), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010 a, No. 3, pp. 5–17.
 12. Solov'ev V.I., Uspensky S.A., Uspensky A.B. Razvitie metodov monitoringa temperatury poverhnosti sushi po dannym geostatsionarnykh sputnikov novogo pokoleniya (Monitoring of land surface temperatures based on data from new generation geostationary satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010 b, Vol. 7, No. 2, pp. 67–74.
 13. Uspensky S.A., Uspensky A.B., Rublev A.N. Analiz vozmozhnosti monitoringa pri poverhnostnoy temperatury vozduha po dannym geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov (Analysis of Land Air Temperature Mapping Capabilities with Geostationary Satellite Data), *Proceeding of ISARD-2011*, Saint-Petersburg, June 2011, Saint-Petersburg State University Publisher House, pp. 37–38.
 14. Uspensky A.B., Shcherbina G.I. Otsenka temperatury i izluchatel'noy sposobnosti poverhnosti sushi po dannym izmereniy uhodyashchego teplovogo izlycheniya s ISZ NOAA (Assessment of land surface temperature and emissivity from NOAA satellite measurement data on outgoing heat radiation), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1996, No. 5, pp. 4–13.
 15. 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, Vol. 244, pp. 137–156.
 16. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC), Report № 27, Ed. by BAHC Core Project Office, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Germany, 1993, 103 p.
 17. 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, Vol. 39, pp. 971–982.
 18. Gelfan A., Muzylev E., Uspensky A., Startseva Z., Romanov P., Remote Sensing Based Modeling of Water and Heat Regimes in a Vast Agricultural Region, In: *Remote Sensing – Applications*. Ed. Boris Escalante-Ramirez, Rijeka, Croatia: InTech – Open Access Publisher, 2012, Chapter 6, pp. 141–176.
 19. Gowda P.H., Chavez J.L., Colaizzi P.D., Evette S.R., Howell T.A., Tolk J.A., ET Mapping for Agricultural Water Management: Present Status and Challenges, *Irrigation Science*, 2008, Vol. 26, pp. 223–237. doi:10.1007/s00271-007-0088-6.
 20. Moehrlen C., Literature Review of Current Used SVAT Models, *Internal Report 04-99*, 1999, Cork: University College Cork, Department of Civil & Environmental Engineering.
 21. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B., Land-Surface Modeling in Hydrological Perspective – a Review, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, pp. 229–241. doi:10.5194/bg-3-229-2006.
 22. Pitman A.J., The Evolution of, and Revolution In, Land Surface Schemes Designed for Climate Models, *International Journal of Climatology*, 2003, Vol. 23, pp. 479–510. doi:10.1002/joc.893.
 23. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S., Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5775–5799.
 24. Uspensky A.B., Shcherbina G.I., Derivation of land surface temperatures and emissivities from satellite IR window measurements, *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 21, No. 3, pp. 433–437.
 25. Wan Z., Dozier J., A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1996, Vol. 34, No. 4, pp. 892–905.