# Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона

**Е. Л. Музылев[1], З. П. Старцева[1], А. М. Зейлигер[2], О. С. Ермолаева[2], Е. В. Волкова[3], Е. В. Василенко[3], А. И. Осипов[4]**

[1] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*
*E-mail: muzylev@iwp.ru*

[2] *Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127550, Россия*
*E-mail: azeiliguer@mail.ru*

[3] *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Москва, 123242, Россия*
*E-mail: quantocosa@bk.ru*

[4] *Агрофизический научно-исследовательский институт Санкт-Петербург, 195220, Россия*
*E-mail: aosipov2006@mail.ru*

Представлены оценки характеристик водного и теплового режимов территории части Центрально-Чернозёмного региона, преимущественно занятой посевами сельскохозяйственных культур, для сезонов вегетации 2016–2017 гг. Данные оценки были получены с помощью модели вертикального влаго- и теплообмена поверхности суши с атмосферой LSM (Land Surface Model) при использовании спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. Эта информация была представлена данными измерений радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), МСУ-МР (ИСЗ «Метеор-М» № 2), SEVIRI (ИСЗ Meteosat-10, -11, -8). В число рассчитываемых с помощью модели характеристик входят влагозапасы почвы, суммарное испарение, вертикальные тепловые потоки, температура подстилающей поверхности, влажность и температура почвы на разных глубинах. В рамках данного подхода для исследуемой территории были тестированы методики использования в модели оценок метеорологических характеристик (осадков, температуры поверхности растительного покрова и почвы, эффективной температуры подстилающей поверхности) и характеристик растительности (вегетационного индекса NDVI, проективного покрытия растительностью *B*, листового индекса LAI и др.), построенных по данным новых спутников (Meteosat-11, -8). Проведено сравнение с фактическими значениями величин влагосодержания почвы *W* и суммарного испарения *Ev*, рассчитанных с помощью модели, в их динамике за сезон вегетации при различных вариантах оценки характеристик растительности и метеорологических характеристик, построенных по данным измерений всех названных сенсоров. Погрешность оценки оказалась в пределах 15 % для *W* и 25 % для *Ev*. Показана возможность использования при моделировании оценок влажности поверхности почвы, полученных по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp в СВЧ-диапазоне, для выбора начальных условий при расчётах влагозапасов почвы и для расчёта испарения с поверхности почвы $Ev_g$, являющегося одной из характеристик водного режима территории. Рассчитанные значения $Ev_g$ использовались непосредственно при расчёте влагосодержания почвы, а также при задании верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве.

**Ключевые слова:** моделирование, спутниковые данные, влагозапасы почвы, суммарное испарение, водный и тепловой режимы, влажность поверхности почвы, осадки, температура подстилающей поверхности, листовой индекс, проективное покрытие

Одобрена к печати: 10.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60

## Введение

Получение надёжных оценок водообеспеченности больших по площади территорий сельскохозяйственных районов является важной задачей для организации рационального водопользования, успешного ведения сельского хозяйства, составления планов развития этих районов и пр. Оценки количества выпадающих осадков, запасов почвенной влаги, как одного из основных показателей водообеспеченности, и объёмов испарения, представляющего безвозвратные потери воды, могут быть объединены в рамках исследования динамики водного режима территорий. Наиболее подходящим инструментом для проведения таких исследований являются физико-математические модели влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой LSM (Land Surface Model), позволяющие учитывать характерные особенности подстилающей поверхности (ПП) и разнообразие метеорологических условий рассматриваемого региона (Музылев и др., 2017; Biftu, Gan, 2001; Chen et al., 2005; Gowda et al., 2008; Moehrlen, 1999; Pitman, 2003; Startseva et al., 2014). В настоящее время во многих странах разработаны LSM разного уровня, объединяемые общим подходом — использованием спутниковой информации (Зейлигер, 2016; Зейлигер, Ермолаева, 2014, 2016а–г; Зейлигер и др., 2015; Музылев и др., 2002, 2005, 2010, 2015, 2017; Anderson et al., 1997; Bach, Mauser, 2003; Bastiaanssen et al., 1998a, b; Bezerra et al., 2015; Boegh et al., 2004; French et al., 2015; Gelfan et al., 2012; Leng et al., 2017; Muzylev et al., 2018; Startseva et al., 2014; Taconet et al., 1986; Vazifedoust et al., 2009; Yang et al., 2010, 2012; Zeyliger, Ermolaeva, 2016, 2017). Привлечение этой информации позволяет повысить точность производимых оценок характеристик водного и теплового режимов.

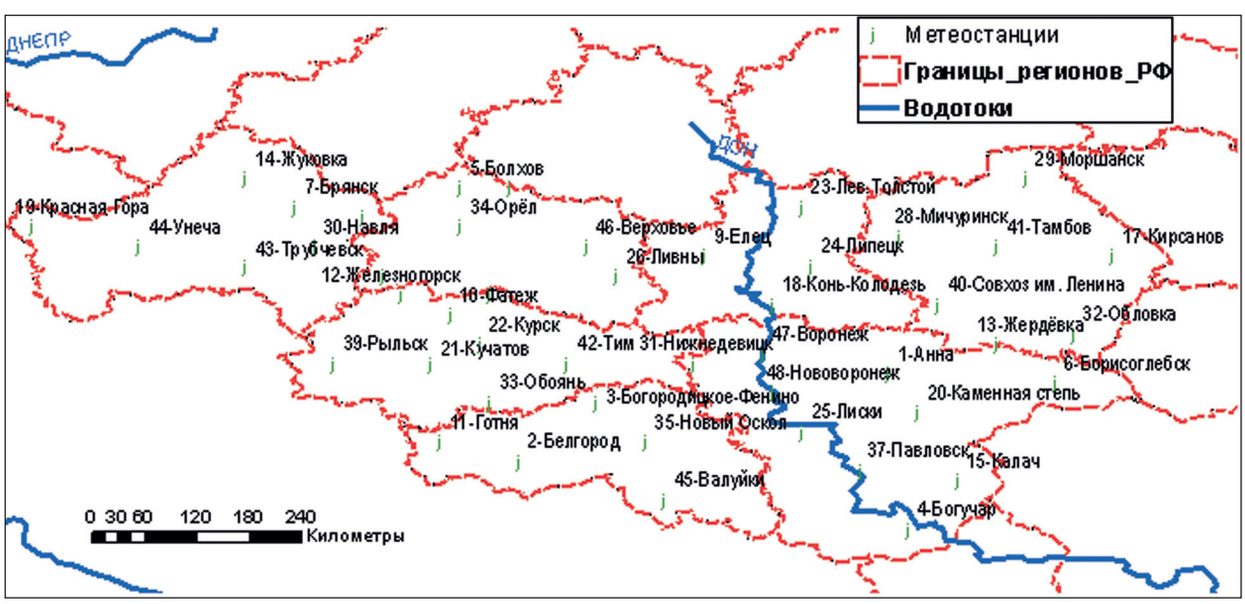



*Рис. 1.* Расположение агрометеорологических станций на рассматриваемой территории части ЦЧР

В соответствии с изложенным целью работы является продолжение начатого ранее исследования возможностей использования спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик в модели LSM, положенной в основу разрабатываемого метода расчёта элементов водного и теплового режимов территории обширного сельскохозяйственного региона за сезон вегетации. Оценки этих характеристик были построены при тематической обработке данных измерений радиометров AVHRR/NOAA, МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 и SEVIRI/Meteosat-10, -11 в видимом и ИК диапазонах спектра. В их числе оценки вегетационного индекса NDVI, излучательной способности ПП *E*,

проективного покрытия растительностью $B$ и листового индекса LAI, осадков, температуры подстилающей поверхности (ТПП) трёх типов (температуры поверхности почвы $T_{sg}$ и растительного покрова $T_a$, а также эффективной ТПП $T_{s.eff}$ ($T_{ls}$ для SEVIRI)). При моделировании также использовались оценки влажности поверхности почвы, полученные по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp-B в СВЧ-диапазоне.

Исследования проводились на примере сезонов вегетации 2016–2017 гг. для находящейся в зоне лесостепи и входящей в Центрально-Чернозёмный регион (ЦЧР) территории семи областей Европейской части России (Курской, Воронежской, Белгородской, Орловской, Липецкой, Тамбовской и Брянской) общей площадью 227 300 км$^2$ с координатами 49°30′–54° с. ш. и 31–43° в. д. (*рис. 1*, см. с. 45). На рассматриваемой территории находятся 48 агрометеорологических станций, данные наблюдений на которых использовались при моделировании. Эти данные включают результаты стандартных срочных трёхчасовых метеорологических наблюдений, а также декадных измерений влагозапасов почвы под различными культурами.

## Краткое описание модели влаго- и теплообмена

Использованная в работе LSM (модель вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва – растительность – атмосфера») предназначена для оценки влагозапасов деятельного слоя почвы $W$, суммарного испарения $Ev$ (испарения с голой почвы и транспирации влаги растительностью), вертикальных тепловых потоков с ПП, распределений влажности и температуры почвы по глубине в их динамике, температуры поверхностей почвы $T_g$ и растительного покрова $T_f$, а также радиационной ТПП $T_s$.

Первоначальная версия модели была рассчитана на получение оценок названных величин для отдельных агрометеорологических станций (Кучмент и др., 1989; Kuchment, Startseva, 1991). При появлении регулярной спутниковой информации о характеристиках ПП модель была модифицирована и приспособлена для использования этой информации (Музылев и др., 2002, 2005). Детальное описание модели и способов оценки её параметров представлено в работах (Музылев и др., 2010, 2015, 2017; Gelfan et al., 2012; Startseva et al., 2014), здесь отметим лишь некоторые её свойства. В основу модели положены два уравнения — влагопереноса и теплопроводности для деятельного слоя почвы, граничные условия для которых представляются потоками влаги и тепла через верхнюю и нижнюю границы слоя. Испарение с поверхности почвы и транспирация растительности определяются с помощью полуэмпирических зависимостей от влажности воздуха и температур. Температуры $T_g$ и $T_f$ 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. Начальные условия для уравнений влагопереноса и теплопроводности задаются на момент начала вегетации по измерениям профилей влажности и температуры почвы под различными культурами на агрометеорологических станциях. Характеристики почв и растительности представляются в модели в качестве параметров, а метеорологические характеристики (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация) — в качестве входных переменных. Значения последних определяются по данным стандартных сетевых трёхчасовых метеорологических наблюдений, а осадки и температура ещё и по данным ИСЗ. Значения характеристик почв были получены при использовании базы данных HWSD (Harmonized World Soil Database). Верификация модели производилась по результатам сравнения величин $W$, рассчитанных и измеренных на нескольких агрометеорологических станциях региона.

## Построение оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик по данным спутниковых измерений в видимом и ИК диапазонах

Оценки характеристик растительности, осадков и ТПП $T_{sg}$, $T_a$ и $T_{s.eff}$ ($T_{ls}$) по данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР и расчёты влагосодержания почвы $W$, суммарного испарения $Ev$ и других характеристик водного и теплового режимов, а также ТПП $T_f$, $T_g$ и $T_s$ производились в узлах регулярной вычислительной сетки, накладывавшейся на карту исследуемого региона. Размер ячейки сетки составлял 3×3 пикселя радиометра AVHRR (~7×5 км) (при размере пикселя для ИК-каналов AVHRR в 1′ по широте и 1,5′ по долготе, разрешении для аналогичных каналов SEVIRI — 3′ по широте и 3,6′ по долготе и для таких же каналов МСУ-МР ~1 км совмещение данных сеток производилось с помощью специально разработанных программ).

Первыми характеристиками, оценки которых были построены в конце 1990-х гг. по регулярно принимавшимся данным радиометра AVHRR/NOAA в описанном масштабе, были NDVI, $E$, $B$ и ТПП. Эти оценки были получены при тематической обработке спутниковых данных с использованием специально разработанных алгоритмов, в основу которых были положены формулы $\mathrm{NDVI} = (A_2 - A_1)/(A_2 + A_1)$, где $A_1$ и $A_2$ — альбедо в 1-м и 2-м каналах AVHRR, $B = (\mathrm{NDVI} - \mathrm{NDVI}_g)/(\mathrm{NDVI}_v - \mathrm{NDVI}_g)$, где $\mathrm{NDVI}_v$ и $\mathrm{NDVI}_g$ — максимальное и минимальное значения NDVI в пределах пикселя, принимавшиеся за вегетационные индексы для растительности и голой почвы. Значения $T_{sg}$ и $T_a$ рассчитывались с помощью регрессионных алгоритмов с предикторами $T_4$, $T_5$, $E_4$ и $E_5$ (температурой и излучательной способностью в 4-м и 5-м каналах AVHRR), а $T_{s.eff}$ вычислялась по формуле $T_{s.eff} = BT_a + (1 - B)T_{sg}$ (Успенский, Щербина, 1996; Uspensky, Shcherbina, 1998; Wan, Dozier, 1996). В исследованиях последних лет с привлечением данных других сенсоров для оценки $B$ использовалось выражение $B = 2(\mathrm{NDVI} - 0{,}1)$ при $0{,}1 < \mathrm{NDVI} < 0{,}6$, а выражения для NDVI и $T_{s.eff}$ остались без изменений. Оценки LAI производились с использованием эмпирических зависимостей от NDVI: $\mathrm{LAI} = 1{,}71\,\mathrm{NDVI} + 0{,}48$ для луговой растительности (Biospheric..., 1993), $\mathrm{LAI} = -2{,}5\ln(1{,}2 - 2\,\mathrm{NDVI})$ для сельскохозяйственных культур (Biftu, Gan, 2000, 2001), $\mathrm{LAI} = 0{,}21\exp(\mathrm{NDVI}/0{,}264)$ для пастбищ (Biospheric..., 1993). Из-за значительной генерализации спутниковых данных и отсутствия точных схем землепользования потребовалось производить выбор зависимостей LAI для конкретных агрометеорологических станций. Сравнение временных ходов LAI за сезон вегетации показало, что ход спутниковых оценок отличается небольшим количеством скачкообразных изменений, характерных для моментов скашивания растений или периода уборки, что также может быть обусловлено генерализацией спутниковой информации даже в пределах пикселя. Одним из критериев корректности выбора описания для LAI являлась близость или даже совпадение значений $W$, рассчитанных при тех или иных значениях LAI, с измеренными. Помимо этого, в наших предшествующих исследованиях (Музылев и др., 2017) проводилось сравнение значений $B$ и LAI, рассчитанных по данным SEVIRI с использованием приведённых выражений для LAI, с аналогичными оценками также по данным SEVIRI, полученными в LSA SAF (Прикладном центре анализа спутниковых данных о поверхности Земли, Лиссабон, Португалия) и считавшимися эталонными. Погрешности оценок $B$ и LAI составили соответственно 10 и 15 %. При переносе полученных значений погрешностей на данные 2017 г. сравнение временных ходов LAI за сезон вегетации позволяет выбрать формулы для его оценки для конкретных участков исследуемой территории.

Оценки по данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР суточных, декадных и месячных сумм осадков для территории ЦЧР за сезоны вегетации 2016–2017 гг. были получены с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации её типов, а также выделения зон осадков и определения их максимальной интенсивности в пределах пикселя (Волкова, 2013, 2014, 2017; Волкова, Успенский, 2010, 2015; Волкова и др., 2015). Основной частью методики является реализация перехода от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных сумм. Эти суммы рассчитываются по уравнениям регрессии, где в качестве предикторов используются данные измерений в пяти каналах AVHRR, 11 каналах

SEVIRI и трёх каналах МСУ-МР, а также их разности. Проверка достоверности оценки осадков по данным всех сенсоров производилась при сравнении их вычисленных суточных, декадных и месячных сумм между собой и с аналогичными суммами, определёнными по данным наблюдений на агрометеорологических станциях региона. Вероятность детектирования по спутниковым данным зон осадков, совпадающих с выявленными по данным наземных наблюдений, составила порядка 80 % для каждого радиометра. Анализ пространственных распределений осадков, построенных с помощью КПМ для ряда дат сезона вегетации 2017 г., и результатов наземных оценок суточных сумм осадков показывает неплохое соответствие обоих видов оценок. Представленный на *рис. 2а* временной ход декадных сумм осадков, определявшихся в течение сезона вегетации 2017 г. по наблюдениям на одной из агрометеорологических станций региона и по данным всех сенсоров, демонстрирует приемлемое совпадение фактического и рассчитанного количества осадков.

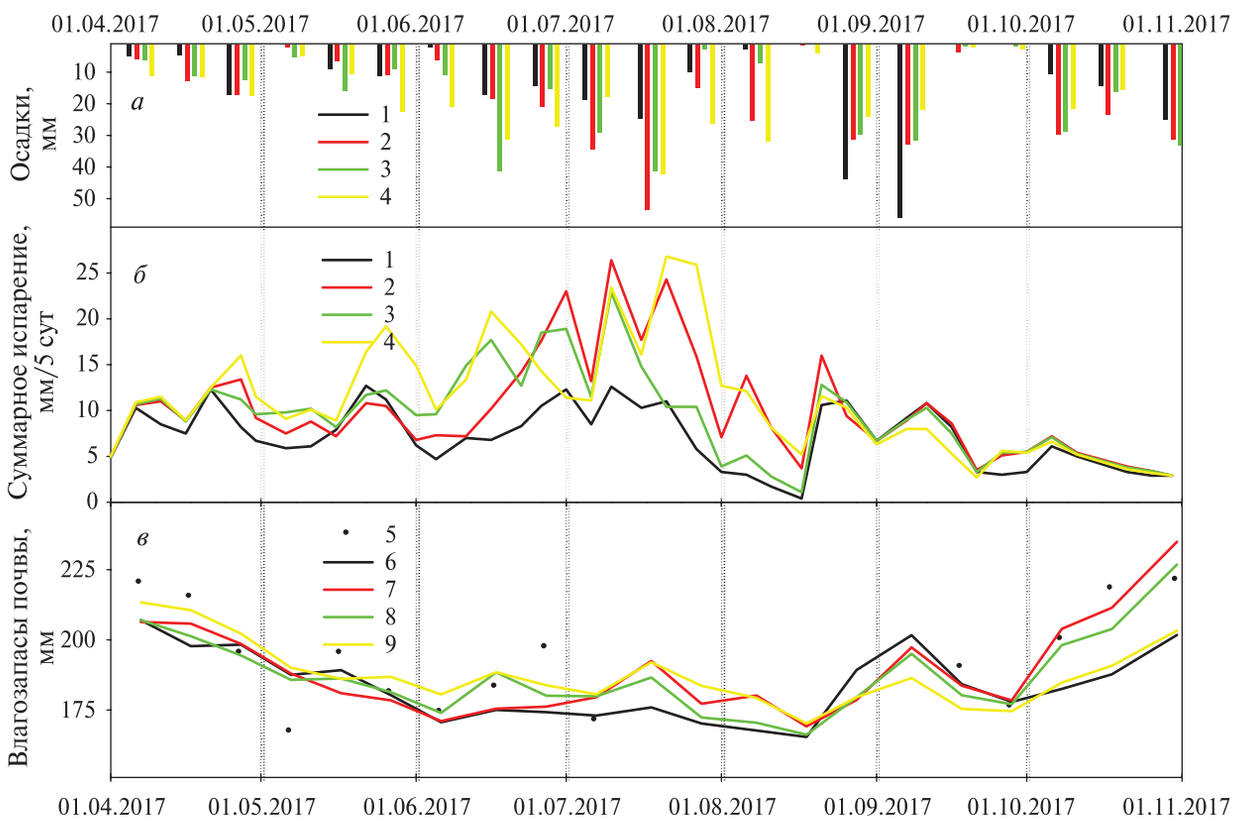



*Рис. 2.* Агрометеорологическая станция Конь-Колодезь. Сезон вегетации 2017 г.: *а* — суммы осадков за декаду, измеренные (1) и рассчитанные по данным SEVIRI (2), МСУ-МР (3) и AVHRR (4); *б* — значения суммарного испарения, рассчитанные с помощью модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (1), SEVIRI (2), МСУ-МР (3) и AVHRR (4); *в* — влагозапасы метрового слоя почвы, измеренные (5) и рассчитанные с помощью модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (6), SEVIRI (7), МСУ-МР (8) и AVHRR (9)

Как отмечалось выше, оценки ТПП по данным AVHRR строились по результатам тематической обработки этих данных с использованием регрессионных зависимостей от измеренных значений $T_4$, $T_5$, $E_4$, $E_5$. Точность полученных оценок $T_{sg}$, $T_a$ и $T_{s.eff}$ выявлялась при сравнении с результатами наземных измерений температур. Среднеквадратические отклонения (СКО) значений $T_{sg}$, $T_a$ и $T_{s.ejj}$ от измеренных для исследуемой территории составили соответственно 3,5–4,9; 2,0–2,7 и 2,2–3,5 °С (Музылев и др., 2002, 2005, 2010). В наших последних исследованиях эти значения СКО принимались за эталонные. После начала приёма в НИЦ «Планета» информации с геостационарного спутника Meteosat-9 специалистами «Планеты»

была разработана специальная технология оценки ТПП $T_{ls}$ (Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010а, б) и $T_a$ (Успенский и др., 2011). СКО оценок $T_{ls}$ от данных наземных наблюдений находилось в пределах 2–3 °С; различия значений $T_{ls}$ (SEVIRI) и $T_{s.eff}$ (AVHRR) для большинства спутниковых измерений не превышали СКО оценок $T_{s.eff}$ (AVHRR) (Музылев и др., 2015); СКО оценок $T_a$ (SEVIRI) от результатов синхронных сетевых наземных наблюдений составляли 1,8–2,9 °С (Успенский и др., 2011).

К настоящему времени на основе КПМ был разработан вычислительный алгоритм для расчёта температур, отлаженный на данных AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat для ЦЧР (Волкова, Успенский, 2016) и использовавшийся также для оценки ТПП $T_a$, $T_{sg}$ и $T_{s.eff}$ по данным МСУ-МР/«Метеор» № 2 (Волкова и др., 2017). Значения $T_{sg}$ и $T_a$ восстанавливались методом GSW (Generalized Split-Window) (Land..., 2010) с помощью уравнений регрессии по измеренной со спутника радиационной температуре в каналах 11 и 12 мкм ($T_{11}$, $T_{12}$) для безоблачных пикселей. Основным недостатком предложенного метода является необходимость существования архива данных наземных измерений $T_f$ и $T_g$, синхронных спутниковым. Наибольшее количество ошибок определения ТПП по спутниковым данным в течение сезона вегетации приходится на лето (вследствие резких перепадов температур в пределах пикселя, обусловленных присутствием теней от облаков и крупных объектов, наличием небольших холодных водоёмов, перегретых крыш, дорог и пр.). СКО среднесуточных оценок $T_a$ по данным МСУ-МР оказались равными 1,9–2,5 °С, оценок $T_{sg}$ — 2,0–3,2 °С и $T_{s.eff}$ — 1,9–2,8 °С. Корректность оценок $T_{sg}$, $T_a$ и $T_{s.eff}$ ($T_{ls}$), построенных с помощью КПМ по данным МСУ-МР, AVHRR и SEVIRI, проверялась также для сезонов вегетации 2016–2017 гг. путём сравнения их значений между собой, с данными измерений температуры воздуха на агрометеорологических станциях региона и с результатами расчётов с помощью LSM при использовании наземной и спутниковой информации о температурах. Для подавляющего числа оценок ТПП по спутниковым данным и результатов расчётов по модели их разности не превышали СКО оценок $T_{sg}$, $T_a$ и $T_{s.eff}$ по данным AVHRR.

## Оценка основных элементов водного и теплового режимов исследуемой территории с использованием спутниковой информации о характеристиках растительности и метеорологических характеристиках

Построенные по спутниковой информации оценки характеристик растительности, осадков и ТТП использовались в модели путем замены их значений, определённых при наземных измерениях, на данные спутниковые оценки (Музылев и др., 2010, 2015, 2017; Gelfan et al., 2012; Muzylev et al., 2018; Startseva et al., 2014). Учёт пространственной и временной изменчивости этих оценок обеспечивался их вводом в модель на каждом временном шаге во всех узлах вычислительной сетки. При отсутствии в отдельные дни спутниковых оценок ТПП и осадков для каких-нибудь узлов значения этих величин, а также влажности воздуха рассчитывались с помощью процедуры интерполяции IWDM (Inverse weighted distance method) данных стандартных метеорологических наблюдений. Корректность производившихся замен подтверждена описанными выше результатами сопоставления временных ходов LAI, LST и осадков за рассматривавшиеся сезоны вегетации. Достоверность рассчитанных по модели при таком подходе значений *W* и *Ev* для всех вариантов оценки LAI, *B*, ТПП и осадков по данным всех сенсоров была подтверждена результатами их сравнения друг с другом, а также с данными измерений на агрометеорологических станциях. Ошибки оценки *W* для подавляющего числа сроков измерений не превышали 15 % (см. *рис. 2б*), а среднеквадратическая оценка значений *Ev* за пентаду находилась в пределах нескольких миллиметров (~25 %), что может рассматриваться как приемлемый результат (см. *рис. 2в*). Отдельные отскоки точек графика *Ev* 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.

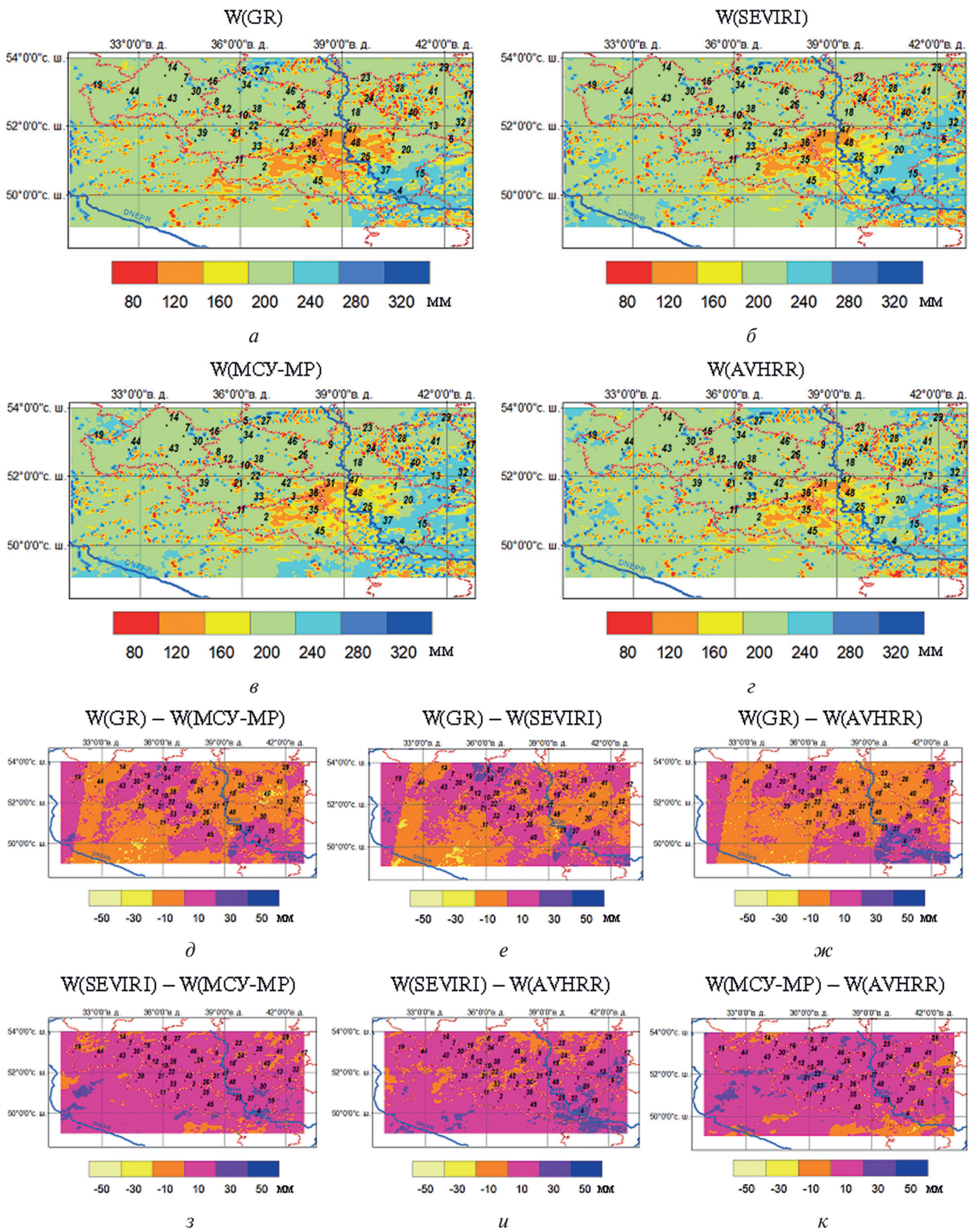


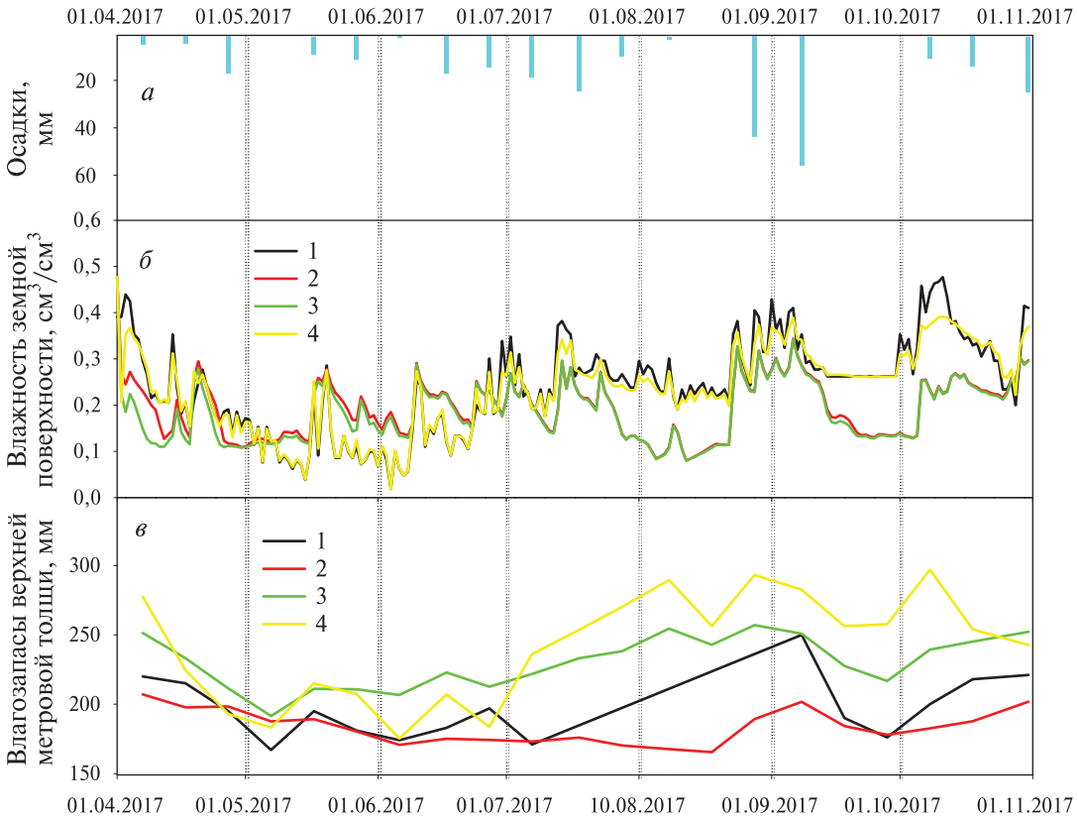

*Рис. 3.* Распределение по площади исследуемого региона значений влагозапасов метрового слоя почвы *W* (мм) на 29 мая 2017 г., рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков: по наземным измерениям — *W*(GR) (*а*), по данным SEVIRI — *W*(SEVIRI) (*б*), МСУ-МР — *W*(МСУ-МР) (*в*) и AVHRR — *W*(AVHRR) (*г*) и все их разности (*д–к*)

Рассчитанные для сезонов вегетации 2016–2017 гг. величины *W*, *Ev*, потоков скрытого и явного тепла и других характеристик водного и теплового режимов, ТПП трёх типов, а также распределения температуры и влажности почвы по глубине для территории части ЦЧР

площадью 227 300 км$^2$ являются конечными продуктами моделирования. Для оценки влагообеспеченности региона необходимо построение полей значений *W* и *Ev* для всей исследуемой территории. На *рис. 3* (см. с. 50) изображены поля значений *W* на один из дней сезона вегетации 2017 г., определённых с помощью модели при оценках суточных сумм осадков по наземным наблюдениям, данным SEVIRI, МСУ-МР и AVHRR, а также поля всех возможных разностей значений *W*, рассчитанных при использовании спутниковых и наземных оценок осадков. Как видно по рисункам, погрешности представленных оценок *W* находятся в указанных выше пределах, что подтверждает возможность применения методов моделирования с использованием спутниковой информации для оценки характеристик водного и теплового режимов значительных по размерам территорий.

## Исследование возможности использования при моделировании оценок влажности поверхности почвы, полученных по данным измерений в СВЧ-диапазоне

Исследована также возможность использования оценок влажности поверхности почвы (SSM, Soil Surface Moisture), полученных по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp-B (всепогодного зондировщика ПП в СВЧ-диапазоне) при расчёте запасов почвенной влаги. Результаты измерений ASCAT выражаются в процентах от 0 до 100, при этом граничные значения соответствуют отсутствию влаги в почве или её полному насыщению. Полученные оценки (в процентах) преобразуются в объёмную влажность (в см$^3$/см$^3$) верхнего трёхсантиметрового слоя почвы при умножении на значения пористости. Проверка корректности таких оценок для рассматриваемой территории за сезоны вегетации 2016–2017 гг. проводилась путём их сравнения с результатами расчётов SSM по модели: при использовании данных наземных наблюдений; задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT; оценке испарения с почвы при использовании данных ASCAT на каждом временном шаге (*рис. 4б*). Наилучшее совпадение с оценками SSM по данным ASCAT получено при введении в выражение для расчёта испарения значений SSM, определённых с помощью ASCAT. Следует отметить соответствие временных ходов SSM за сезон вегетации динамике выпадения осадков (*рис. 4а*). Сравнение распределений SSM по площади региона, построенных по данным ASCAT, а также полученных при расчётах по модели при разных начальных условиях, показало, что для большей части территории различия спутниковых и модельных оценок поверхностной влажности находились в допустимых пределах (±0,15 см$^3$/см$^3$). Отдельные расхождения, существующие для некоторых участков территории, могут быть обусловлены неточной оценкой предшествующих осадков, а также ошибками самого скаттерометра. В целом адекватность данных ASCAT позволяет использовать их в LSM при задании начальных условий для уравнения вертикального влагопереноса в почве и последующего расчёта влагозапасов. Пример такого расчёта представлен на *рис. 4в*. Анализ особенностей временного хода величин *W* за сезон вегетации, рассчитанных при разных начальных условиях, сформированных с использованием оценок SSM по данным ASCAT, показал, что в первой половине сезона вегетации (примерно до конца созревания зерновых) наибольшая точность расчёта *W* обеспечивается благодаря учёту данных ASCAT при оценке испарения с почвы, в то время как во второй половине сезона на бóльшую точность претендуют расчёты с использованием непосредственно данных ASCAT. Сравнение полей влагозапасов *W* для исследуемой территории, построенных по результатам расчётов по модели, также показало, что использование данных ASCAT для задания начального профиля влажности почвы при таких расчётах повышает точность оценки величин *W*. Полученные результаты подчёркивают значимость правильного задания начальных условий для точного определения этих величин. Рассчитанные с помощью модели значения испарения с поверхности почвы могут также использоваться при формировании верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве. Сравнение результатов расчётов величин *W* с граничными условиями первого и второго рода показало, что использование условия второго рода является более предпочтительным, хотя это заключение носит лишь предварительный характер.



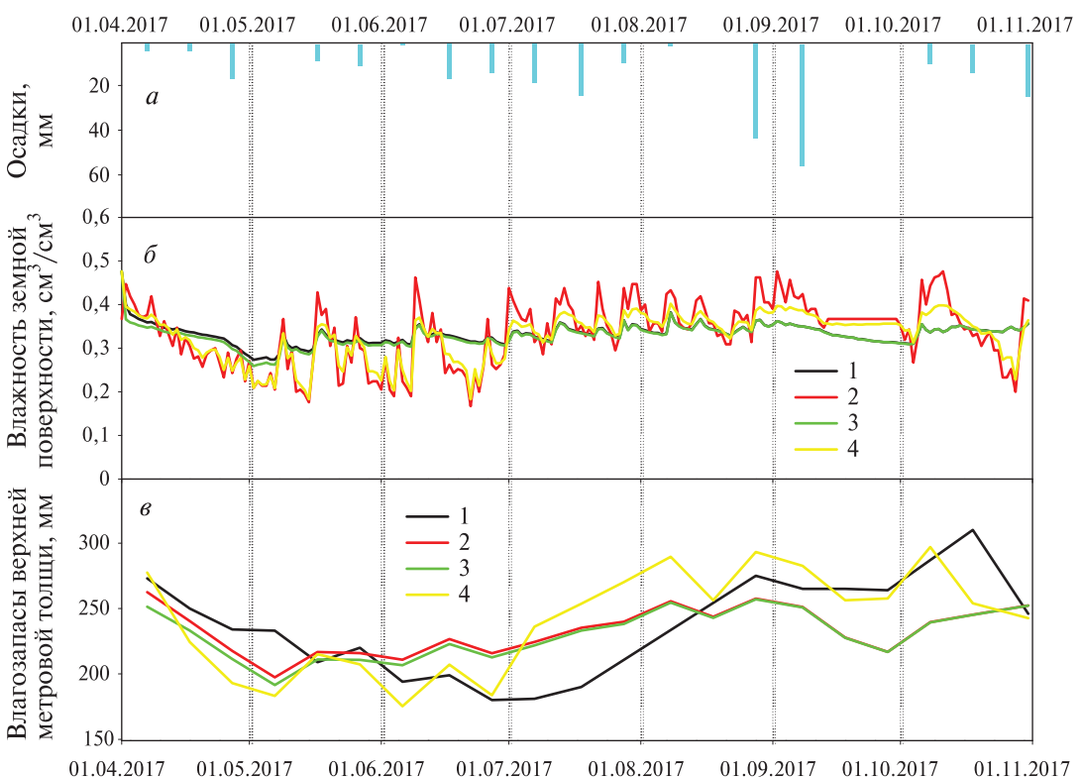




*Рис. 4.* Агрометеорологические станции Конь-Колодезь (*вверху*), Орёл (*внизу*). Сезон вегетации 2017 г. Осадки (*а*); влажность поверхности почвы (*б*), определённая по данным ASCAT (1) и рассчитанная по модели: при использовании наземных данных (2), при задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT (3), при оценке испарения с почвы с использованием данных ASCAT (4); влагозапасы почвы (*в*): измеренные (1), рассчитанные по модели: при использовании наземных данных (2), при задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT (3), при оценке испарения с почвы с использованием данных ASCAT (4)

## Заключение

Основной результат проведённых исследований — предложенные способы использования в модели влаго- и теплообмена участков суши с атмосферой LSM построенных по спутниковым данным оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик. Конечным результатом моделирования являются оценки влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов территории части Центрально-Чернозёмного района площадью 227 300 км$^2$. Оценки характеристик растительности и метеорологических характеристик были получены с помощью разработанных в последние годы и модифицированных методов и технологий тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР. Все технологии были адаптированы к территории ЦЧР.

В рамках проведённых исследований:

- проведена проверка достоверности оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик, построенных с помощью упомянутых технологий обработки спутниковых данных;
- подтверждена работоспособность процедур замены оценок являющихся параметрами и входными переменными модели величин проективного покрытия *B* и листового индекса LAI, а также осадков и ТПП, полученных по данным наземных наблюдений, на соответствующие спутниковые оценки;
- показана возможность использования оценок влажности поверхности почвы, полученных по спутниковым данным в СВЧ-диапазоне, при расчёте запасов почвенной влаги за сезон вегетации для исследуемой территории;
- результаты расчёта с помощью модели значений влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов за сезоны вегетации 2016–2017 гг. представлены в виде распределений по площади рассматриваемого региона.

Предложенный подход может быть использован при решении различных задач гидрологической и агрогидрологической направленности, таких как получение оценок влагообеспеченности территорий, выполнение гидрологического прогноза состояния этих территорий на основе данных численного гидрометеорологического прогноза и др. При этом возможность ассимиляции спутниковых данных разных спектральных диапазонов способствует успешной реализации разработанных моделей влаго- и теплообмена.

## 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.* Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300–320.
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. *Волкова Е. В.*, *Успенский А. Б.* Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 40–43.

6. *Волкова Е. В.*, *Успенский С. А.* Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 291–303.
7. *Волкова Е. В.*, *Успенский А. Б.*, *Кухарский А. В.* Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.
8. *Волкова Е. В.*, *Музылев Е. Л.*, *Старцева З. П.* Определение температуры подстилающей поверхности по данным МСУ-МР/«Метеор-М» № 2 на примере Центрально-Черноземного региона ЕТР // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД–2017): сб. тез. Санкт-Петербург – Петродворец, 27–30 июня 2017. СПб., 2017. С. 47–49.
9. *Зейлигер А. М.* Управление орошаемым земледелием по данным наземного и космического мониторинга // Управление сельхозпредприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли: монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. С. 194–228.
10. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* Оценка трендов деградации/проградации растительного покрова сельскохозяйственных земель с использованием данных ДЗЗ // 12-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. М: ИКИ РАН, 2014. С. 362.
11. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* (2016а) Результаты компьютерного моделирования водного стресса посевов орошаемой люцерны по данным наземного метеорологического и космического мониторинга температуры подстилающего слоя с использованием ФАО-56 и модели SEBS // Экология. Экономика. Информатика: сб. ст. В 2-х т. Т. 2. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д: Изд-во Южного федер. ун-та, 2016. С. 258–273.
12. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* (2016б) Информационные технологии в мониторинге богарных и орошаемых агроценозов // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10 (ч. 1). С. 62–66.
13. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* (2016в) Анализ режима водного стресса орошаемых агроценозов с использованием данных космического мониторинга агрогидрологических моделей AquaCrop и SWAP // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 352.
14. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* (2016г) Компьютерный код оценки эвапотранспирации агроценозов по данным ДЗЗ // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 353.
15. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.*, *Кричевцова А. Н.* Результаты пространственно-временного анализа наборов данных ДЗЗ по испарению с поверхности суши MOD16 ET за 2000–2009 годы для территории Палласовского района Волгоградской области РФ // Экология. Экономика. Информатика: сб. ст. В 3-х т. Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д: Изд-во Южного федер. ун-та, 2015. С. 35–48.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *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.
20. *Музылев Е. Л.*, *Успенский А. Б.*, *Старцева З. П.*, *Волкова Е. В.*, *Кухарский А. В.*, *Успенский С. А.* Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 17–34.
21. *Музылев Е. Л.*, *Старцева З. П.*, *Успенский А. Б.*, *Волкова Е. В.*, *Василенко Е. В.*, *Кухарский А. В.*, *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.* Использование данных дистанционного зондирования при моделировании

водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136.
22. *Соловьев В.И.*, *Успенский С.А.* Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // Исследование Земли из космоса. 2009. № 3. С. 79–89.
23. *Соловьев В.И.*, *Успенский А.Б.*, *Успенский С.А.* (2010а) Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 5–17.
24. *Соловьев В.И.*, *Успенский С.А.*, *Успенский А.Б.* (2010б) Развитие методов мониторинга температуры поверхности суши по данным геостационарных спутников нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 67–74.
25. *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.
26. *Успенский С.А.*, *Успенский А.Б.*, *Рублев А.Н.* Анализ возможности мониторинга приповерхностной температуры воздуха по данным геостационарных метеорологических спутников // Международный симп. «Атмосферная радиация и динамика»: сб. тез. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. С. 37–38.
27. *Anderson M.C.*, *Norman J.M.*, *Diak G.R.*, *Kustas W.P.*, *Mecikalski J.R.* A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing // Remote Sensing of Environment. 1997. V. 60. P. 195–216.
28. *Bach H.*, *Mauser W.* Methods and Examples for Remote Sensing Data Assimilation in Land Surface Process Modeling // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. P. 1629–1636.
29. *Bastiaanssen W.G.M.*, *Menenti M.*, *Feddes R.A.*, *Holtslag A.A.M.* (1998a) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1. Formulation // J. Hydrology. 1998. V. 212–213. P. 198–212.
30. *Bastiaanssen W.G.M.*, *Pelgrum H.*, *Wang J.*, *Ma Y.*, *Moreno J.F.*, *Roerink G.J.*, *van der Wal T.* (1998b) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2. Validation // J. Hydrology. 1998. V. 212–213. P. 213–229.
31. *Bezerra B.G.*, *Silva B.B.*, *Santos C.A.C.*, *Bezerra J.R.C.* Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches // Advances in Remote Sensing. 2015. V. 4. No. 3. P. 234–247.
32. *Biftu G.F.*, *Gan T.Y.* Assessment of evapotranspiration models applied to a watershed of Canadian Prairies with mixed land uses // J. Hydrologic Processes. 2000. V. 18. P. 1305–1325.
33. *Biftu G.F.*, *Gan T.Y.* Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River basin, Alberta, using remotely sensed data // J. Hydrology. 2001. V. 244. P. 137–156.
34. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS). Report No. 27 / ed. by BAHC Core Project Office. Berlin: Institut fűr Meteorologie. Freie Universität, 1993. 103 p.
35. *Boegh E.*, *Thorsen M.*, *Butts M.B.*, *Hansen S.*, *Christiansen J.S.*, *Abrahamsen P.*, *Hasager S.B.*, *Jensen N.O.*, *Van der Keur P.*, *Refsgaard J.C.*, *Schelde K.*, *Soegaard H.*, *Thomsen A.* Incorporating Remote Sensing Data in Physically Based Distributed Agro-Hydrological Modelling // J. Hydrology. 2004. V. 287. P. 279–299.
36. *Chen J.M.*, *Chen X.*, *Ju W.*, *Geng X.* Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs // J. Hydrology. 2005. V. 305. No. 1. P. 15–39.
37. *French A.N.*, *Hunsaker D.J.*, *Thorp K.R.* Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 158. P. 281–294.
38. *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. Rijeka, Croatia: InTech — Open Access Publisher, 2012. Ch. 6. P. 141–176.
39. *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. V. 26. P. 223–237.
40. *Kuchment L.S.*, *Startseva Z.P.* Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture in wheat fields to changes in climate and direct effects of carbon dioxide // Hydrological Sciences J. 1991. V. 36. No. 6. P. 631–643.
41. Land Surface Temperature (LST): Product User Manual. Iss. 2.5. LSA SAF, 2010. 49 p.
42. *Leng P.*, *Li Z.-L.*, *Duan S.-B.*, *Gao M.-F.*, *Huo H.-Y.* A practical approach for deriving all-weather soil moisture content using combined satellite and meteorological data // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 131. P. 40–51.
43. *Moehrlen C.* Literature review of current used SVAT models // Internal Report 04-99. Cork, Ireland: Univ. College, Department of Civil and Environmental Engineering, 1999. P. 1–22.

44. *Muzylev E. L.*, *Startseva Z. P.*, *Uspensky A. B.*, *Volkova E. V.* Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites // Water Resources. 2018. V. 45. No. 5. P. 672–684.
45. *Pitman A. J.* The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models // Intern. J. Climatology. 2003. V. 3. P. 479–510.
46. *Startseva Z.*, *Muzylev E.*, *Volkova E.*, *Uspensky A.*, *Uspensky S.* Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5775–5799.
47. *Taconet O.*, *Bernard L.*, *Vidal-Madjar D.* Evapotranspiration over agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data // J. Applied Meteorology and Climatology. 1986. V. 25. No. 3. P. 284–307.
48. *Uspensky A. B.*, *Shcherbina G. I.* Derivation of land surface temperatures and emissivities from satellite IR window measurements // Advanced Space Research. 1998. V. 21. No. 3. P. 433–437.
49. *Vazifedoust M.*, *Van Dam J. C.*, *Bastiaanssen W. G. M.*, *Feddes R. A.* Assimilation of Satellite Data into Agro-Hydrological Models to Improve Crop Yield Forecasts // Intern. J. Remote Sensing. 2009. V. 30. P. 2523–2545.
50. *Wan Z.*, *Dozier J.* A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. V. 34. No. 4. P. 892–905.
51. *Yang D.*, *Chen H.*, *Lei H.* Estimation of Evapotranspiration Using a Remote Sensing Model over Agricultural Land in the North China Plain // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31. P. 3783–3798.
52. *Yang Y.*, *Shang S.*, *Jiang S.* Remote Sensing Temporal and Spatial Patterns of Evapotranspiration and the Responses to Water Management in a Large Irrigation District of North China // Agricultural and Forest Meteorology. 2012. V. 164. P. 112–122.
53. *Zeyliger A. M.*, *Ermolaeva O. S.* Water Stress and Biomass Monitoring and SWAP Modeling of Irrigated Crops in Saratov Region of Russia // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 18–23 April 2016. V. 18. P. 13486.
54. *Zeyliger A. M.*, *Ermolaeva O. S.* Management Strategies to Sustain Irrigated Agriculture with Combination of Remote Sensing, Weather Monitoring and Forecasting and SWAP Modeling // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 24–28 April 2017. V. 19. P. 15422.

# The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region

**E. L. Muzylev[1], Z. P. Startseva[1], A. M. Zeyliger[2], O. S. Ermolaeva[2], E. V. Volkova[3], E. V. Vasilenko[3], A. I. Osipov[4]**

[1] *Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia*
*E-mail: muzylev@iwp.ru*
[2] *Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow 127550, Russia*
*E-mail: azeiliguer@mail.ru*
[3] *State Research Center "Planeta", Moscow 123242, Russia*
*E-mail: quantocosa@bk.ru*
[4] *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*
*E-mail: aosipov 2006@mail.ru*

Estimates of the water and heat regime characteristics of the part of the Central Black Earth region territory largely occupied by crops are presented for the vegetation seasons 2016–2017. These estimates were obtained using the model of vertical water and heat exchange between land surface and atmosphere LSM (Land Surface Model) utilizing satellite information on the land surface and meteorological conditions. This information was presented by the data of AVHRR/NOAA, MSU-MR/"Meteor-M" No. 2, and SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8. Among the characteristics calcu-

lated using the model are soil water content *W*, evapotranspiration *Ev*, vertical heat fluxes, land surface temperature, soil moisture and temperature at different soil depths. In the frame of this approach, the methods to use satellite-derived from Meteosat-11, -8 data estimates of meteorological characteristics (precipitation, vegetation and soil surface temperatures, effective land surface temperature) and vegetation characteristics (vegetation index NDVI, vegetation cover fraction B, leaf area index LAI, etc.) in the model were tested for the territory under study. Values of *W* and *Ev* in their dynamics during the vegetation season modeled using different variants of satellite-derived vegetation and meteorological characteristic estimation from measurements of all the above sensors were compared with actual *W* and *Ev* values. The estimation errors were within 15 % for *W* and 25 % for *Ev*. The possibility to use estimates of soil surface moisture, obtained from the ASCAT/MetOp scatterometer measurements in the microwave range when modeling was shown. Using these estimates, the initial conditions can be selected when calculating soil water content W and evaporation from the soil surface $Ev_g$, which is one of the water regime characteristics. The calculated $Ev_g$ values were used directly to calculate values of *W* as well as to assign the upper boundary condition for the vertical soil water transfer equation.

**Keywords:** modeling, satellite data, soil water content, evapotranspiration, water and heat regimes, soil surface moisture, precipitation, land surface temperature, leaf area index, vegetation cover fraction

Accepted: 10.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60

## References

1. Volkova E.V., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova, osadkov i opasnykh yavlenii pogody po dannym radiometra AVHRR c MISZ serii NOAA kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (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 i AVHRR/NOAA dlya Evropeiskoi 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., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova i osadkov po dannym radiometra MSU-MR polyarno-orbital'nogo meteosputnika "Meteor-M" No. 2 dlya Evropeiskoi territorii Rossii (Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from MSU-MR radiometer of the polar-orbiting "Meteor-M" No. 2 for the European territory of Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 300–320.
4. Volkova E.V., Uspenskii A.B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova po dannym geostatsionarnogo MISZ Meteosat-9 kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (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. Volkova E.V., Uspenskii A.B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova i osadkov po dannym skaniruyushchikh radiometrov polyarno-orbital'nykh i geostatsionarnykh meteosputnikov (Estimations of the cloud cover parameters and precipitation using data from scanning radiometers of the polar-orbiting and geostationary meteorological satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 5, pp. 40–43.
6. Volkova E.V., Uspenskii S.A., Distantsionnoe opredelenie temperatury podstilayushchei poverkhnosti, prizemnoi temperatury vozdukha i effektivnoi temperatury po sputnikovym dannym dlya yuga Evropeiskoi territorii Rossii (Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 291–303.
7. Volkova E.V., Uspenskii A.B., Kukharskii A.V., Spetsializirovannyi programmnyi kompleks polucheniya i validatsii sputnikovykh otsenok parametrov oblachnosti i osadkov (Specialized complex of programs for retrieving and validating satellite estimates of cloud and precipitation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 7–26.
8. Volkova E.V., Muzylev E.L., Startseva Z.P., Opredelenie temperatury podstilayushchei poverkhnosti po dannym MSU-MR/"Meteor-M" No. 2 na primere Tsentral'no-Chernozemnogo regiona ETR (Estimations of land surface temperature from the MSU-MR/"Meteor-M" No. 2 data for the Central Black Earth Region of the European Russia), *Mezhdunarodnyi simpozium "Atmosfernaya radiatsiya i dinamika"*

(*MSARD–2017*) (Intern. Symp. "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD–2017)), Book of Abstracts, St. Petersburg, 2017, pp. 47–49.

9. Zeiliger A. M., Upravlenie oroshaemym zemledeliem po dannym nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa (Irrigated agriculture management using ground and space monitoring data), In: *Upravlenie sel'khozpredpriyatiem s ispol'zovaniem kosmicheskikh sredstv navigatsii* (*GLONASS*) *i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Agricultural enterprise management using space navigation devices (GLONASS) and remote sensing of the Earth), Moscow: Izd. RGAU-MSKHA, 2016, pp. 194–228.
10. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Otsenka trendov degradatsii/progradatsii rastitel'nogo pokrova sel'skokhozyaistvennykh zemel' s ispol'zovaniem dannykh DZZ (Evaluation of degradation/progradation trends of vegetation cover on agricultural land using remote sensing data), *12-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya* "*Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*" (12th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2014, p. 362.
11. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016a), Rezul'taty komp'yuternogo modelirovaniya vodnogo stressa posevov oroshaemoi lyutserny po dannym nazemnogo meteorologicheskogo i kosmicheskogo monitoringa temperatury podstilayushchego sloya s ispol'zovaniem FAO-56 i modeli SEBS (Results of computer modeling water stress of irrigated alfalfa crops from data on ground-based meteorological and space monitoring the underlying layer temperature using the FAO-56 and SEBS model), In: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: sb. st.*, *V 2 t.*, *T. 2*, *Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economics. Informatics. Vol. 2: Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-on-Don: Izd. Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2016, pp. 258–273.
12. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016b), Informatsionnye tekhnologii v monitoringe bogarnykh i oroshaemykh agrotsenozov (Information technologies in monitoring of rainfed and irrigated agrocenoses), *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, No. 10 (part 1), pp. 62–66.
13. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016c), Analiz rezhima vodnogo stressa oroshaemykh agrotsenozov s ispol'zovaniem dannykh kosmicheskogo monitoringa agrogidrologicheskikh modelei AquaCrop i SWAP (Analysis of the water stress regime of irrigated agrocenoses using space monitoring data of agro-hydrological models AquaCrop and SWAP), *14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya* "*Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*" (14th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"'), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 352.
14. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016d), Komp'yuternyi kod otsenki evapotranspiratsii agrotsenozov po dannym DZZ (Computer code for evaluating the evapotranspiration of agrocenoses from remote sensing data), *14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya* "*Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*" (14th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 353.
15. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Krichevtsova A. N., Rezul'taty prostranstvenno-vremennogo analiza naborov dannykh DZZ po ispareniyu s poverkhnosti sushi MOD16 ET za 2000–2009 gody dlya territorii Pallasovskogo raiona Volgogradskoi oblasti RF (The results of the space-time analysis of the remote sensing data sets on evaporation from the land surface MOD16 ET over 2000–2009 for the territory of the Pallasovsky district of the Volgograd region), In: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: sb. st.*, *V 3 t.*, *T. 3*, *Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economics. Informatics. Vol. 3: Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-on-Don: Izd. Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2015, pp. 35–48.
16. Kuchment L. S., Motovilov Yu. G., Startseva Z. P., Modelirovanie vlagoperenosa v sisteme pochva-rastitel'nost'-prizemnyi sloi atmosfery dlya gidrologicheskikh zadach (Modeling water transfer in the "soil-vegetation-surface layer of atmosphere" system for hydrological goals), *Vodnye resursy*, 1989, No. 2, pp. 32–39.
17. Muzylev E. L., Uspenskii A. B., Startseva Z. P., Volkova E. V., Modelirovanie gidrologicheskogo tsikla rechnykh vodosborov s ispol'zovaniem sinkhronnoi sputnikovoi 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.
18. Muzylev E. L., Uspenskii A. B., Volkova E. V., Startseva Z. P., Ispolzovanie sputnikovoi informatsii pri modelirovanii vertikalnogo teplo- i vlagoperenosa 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.
19. Muzylev E. L., Uspenskii A. B., Startseva Z. P., Volkova E. V., Kukharskii A. V., Modelirovanie sostavlyayushchikh vodnogo i teplovogo balansov dlya rechnogo vodosbora c ispol'zovaniem sputnikovykh dannykh o kharakteristikakh podstilayushchei poverkhnosti (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.

20. Muzylev E. L., Uspenskii A. B., Startseva Z. P., Volkova E. V., Kukharskii A. V., Uspenskii S. A., Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri modelirovanii komponent vodnogo i teplovogo balansov territorii Tsentral'no-Chernozemnykh oblastei Rossii (Utilization of remote sensing data for modeling water and heat balance components of the Russian Central Black Earth Region territory), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 17–34.
21. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspenskii A. B., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Kukharskii A. V., Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov sel'skikh territorii (Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 108–136.
22. Solovjev V. I., Uspensky S. A., Monitoring temperatury poverkhnosti sushi po dannym geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya (Monitoring of land surface temperatures based on data from geostationary meteorological satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 79–89.
23. Solov'ev V. I., Uspenskii A. B., Uspenskii S. A. (2010a), Opredelenie temperatury zemnoi poverkhnosti po dannym izmerenii ukhodyashchego teplovogo izlucheniya s geostatsionarnykh meteorologicheskikh ISZ (Derivation of Land Surface Temperature Using Measurements of IR Radiances from Geostationary Meteorological Satellites), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, No. 3, pp. 5–17.
24. Solovjiev V. I., Uspensky S. A., Uspensky A. B. (2010b), Razvitie metodov monitoringa temperatury poverkhnosti 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, Vol. 7, No. 2, pp. 67–74.
25. Uspenskii A. B., Shcherbina G. I., Otsenka temperatury i izluchatel'noi sposobnosti poverkhnosti sushi po dannym izmerenii ukhodyashchego teplovogo izlucheniya 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.
26. Uspenskii S. A., Uspenskii A. B., Rublev A. N., Analiz vozmozhnosti monitoringa pripoverkhnostnoi temperatury vozdukha po dannym geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov (Analysis of land air temperature mapping capabilities with geostationary satellite data), *Mezhdunarodnyi simpozium "Atmosfernaya radiatsiya i dinamika"* (*MSARD–2011*) (Intern. Symp. "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD–2011)), Book of Abstracts, St. Petersburg: Izd. SPbGU, 2011, pp. 37–38.
27. Anderson M. C., Norman J. M., Diak G. R., Kustas W. P., Mecikalski J. R., A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing, *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 60, pp. 195–216.
28. Bach H., Mauser W., Methods and Examples for Remote Sensing Data Assimilation in Land Surface Process Modeling, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, pp. 1629–1636.
29. Bastiaanssen W. G. M., Menenti M., Feddes R. A., Holtslag A. A. M. (1998a), A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1. Formulation, *J. Hydrology*, 1998, Vol. 212–213, pp. 198–212.
30. Bastiaanssen W. G. M., Pelgrum H., Wang J., Ma Y., Moreno J. F., Roerink G. J., van der Wal T. (1998b), A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2. Validation, *J. Hydrology*, 1998, Vol. 212–213, pp. 213–229.
31. Bezerra B. G., Silva B. B., Santos C. A. C., Bezerra J. R. C., Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches, *Advances in Remote Sensing*, 2015, Vol. 4, No. 3, pp. 234–247.
32. Biftu G. F., Gan T. Y., Assessment of evapotranspiration models applied to a watershed of Canadian Prairies with mixed land uses, *J. Hydrologic Processes*, 2000, Vol. 18, pp. 1305–1325.
33. Biftu G. F., Gan T. Y., Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River basin, Alberta, using remotely sensed data, *J. Hydrology*, 2001, Vol. 244, pp. 137–156.
34. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle* (*BAHS*), *Report No. 27*, Ed. by BAHC Core Project Office, Berlin, Germany: Institut fűr Meteorologie, Freie Universitat, 1993, 103 p.
35. Boegh E., Thorsen M., Butts M. B., Hansen S., Christiansen J. S., Abrahamsen P., Hasager S. B., Jensen N. O., Van der Keur P., Refsgaard J. C., Schelde K., Soegaard H., Thomsen A., Incorporating Remote Sensing Data in Physically Based Distributed Agro-Hydrological Modelling, *J. Hydrology*, 2004, Vol. 287, pp. 279–299.
36. Chen J. M., Chen X., Ju W., Geng X., Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs, *J. Hydrology*, 2005, Vol. 305, No. 1, pp. 15–39.
37. French A. N., Hunsaker D. J., Thorp K. R., Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 158, pp. 281–294.

38. 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 — Application*, Rijeka, Croatia: InTech — Open Access Publisher, 2012, Chapter 6, pp. 141–176.
39. 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.
40. Kuchment L. S., Startseva Z. P., Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture in wheat fields to changes in climate and direct effects of carbon dioxide, *Hydrological Sciences J.*, 1991, Vol. 36, No. 6, pp. 631–643.
41. *Land Surface Temperature* (*LST*): *Product User Manual*, Issue 2.5, LSA SAF, 2010, 49 p.
42. Leng P., Li Z.-L., Duan S.-B., Gao M.-F., Huo H.-Y., A practical approach for deriving all-weather soil moisture content using combined satellite and meteorological data, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, Vol. 131, pp. 40–51.
43. Moehrlen C., Literature review of current used SVAT models, *Internal Report 04-99*, Cork, Ireland: University College, Department of Civil and Environmental Engineering, 1999, pp. 1–22.
44. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B., Volkova E. V., Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, No. 5, pp. 672–684.
45. Pitman A. J., The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models, *Intern. J. Climatology*, 2003, Vol. 3, pp. 479–510.
46. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S., Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5775–5799.
47. Taconet O., Bernard L., Vidal-Madjar D., Evapotranspiration over agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1986, Vol. 25, No. 3, pp. 284–307.
48. Uspensky A. B., Shcherbina G. I., Derivation of land surface temperatures and emissivities from satellite IR window measurements, *Advanced Space Research*, 1998, Vol. 21, No. 3, pp. 433–437.
49. Vazifedoust M., Van Dam J. C., Bastiaanssen W. G. M., Feddes R. A., Assimilation of Satellite Data into Agro-Hydrological Models to Improve Crop Yield Forecasts, *Intern. J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, pp. 2523–2545.
50. Wan Z., Dozier J., A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1996, Vol. 34, No. 4, pp. 892–905.
51. Yang D., Chen H., Lei H., Estimation of Evapotranspiration Using a Remote Sensing Model over Agricultural Land in the North China Plain, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, pp. 3783–3798.
52. Yang Y., Shang S., Jiang S., Remote Sensing Temporal and Spatial Patterns of Evapotranspiration and the Responses to Water Management in a Large Irrigation District of North China, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, Vol. 164, pp. 112–122.
53. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Water Stress and Biomass Monitoring and SWAP Modeling of Irrigated Crops in Saratov Region of Russia, *Geophysical Research Abstracts*, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 18–23 April 2016, Vol. 18, p. 13486.
54. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Management Strategies to Sustain Irrigated Agriculture with Combination of Remote Sensing, Weather Monitoring and Forecasting and SWAP Modeling, *Geophysical Research Abstracts*, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 24–28 April 2017, Vol. 19, p. 15422.