Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий

Е. Л. Музылев¹, З. П. Старцева¹, А. Б. Успенский², Е. В. Волкова², Е. В. Василенко², А. В. Кухарский², А. М. Зейлигер³, О. С. Ермолаева³

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: quantocosa@bk.ru

³ Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127550, Россия E-mail: azeiliguer@mail.ru

Представлены результаты использования оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик, полученных по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA (1997–2016), MODIS/EOS Terra и Aqua (2000–2016), SEVIRI/Meteosat-9, -10 (2009–2016), MCУ-MP/«Метеор-М» №2 (2015-2016), скаттерометра ASCAT/MetOp-A, -В (2014-2016), в физико-математических моделях формирования водного и теплового режимов (SVAT и SWAP) различных по размерам территорий сельскохозяйственного назначения за сезон вегетации. Описаны разработанные или усовершенствованные методы и технологии тематической обработки и анализа спутниковых данных и построения оценок вегетационного индекса NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью В, излучательной способности и температуры подстилающей поверхности (ТПП) трёх типов (температуры поверхности почвы T_o и растительности T_a и эффективной ТПП T_{s.eff} или T_L), осадков, а также оценок влажности поверхности почвы. Индексы LAI и В являются параме трами модели, а ТПП и осадки — входными переменными, их значения вводятся в модель. С помощью модели SVAT для сезонов вегетации 1997-2016 гг. выполнены расчёты влагозапасов почв W, суммарного испарения Еv, вертикальных потоков тепла и влаги и других характеристик водного и теплового режимов. Погрешность полученных оценок находилась в допустимых пределах. Также исследованы возможности использования в модели SVAT оценок влажности поверхности почвы, полученных по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-A, -В для задания начального и верхнего граничного условий для уравнения вертикального влагопереноса в зоне аэрации почвенно-грунтового слоя.

С помощью моделей SWAP и FAO 56 для сезона вегетации 2012 г. при разных метеорологических условиях проведены оценки динамики влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы, транспирации посевов и испарения с поверхности почвы, а также оценки водного стресса агроценозов и их потребностей в воде. Совмещение результатов спутниковых и наземных исследований позволило разработать методику оценки эффективности орошения посевов сельскохозяйственных культур, а также технологию оперативного управления орошением.

Исследования проводились на примере нескольких территорий, находящихся в лесостепной и степной зонах России: водосбора р. Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км² (для сезонов вегетации 1997–2008 гг.); части Центрально-Чернозёмного региона России (ЦЧР), включающей семь её областей общей площадью 227 300 км² (для сезонов вегетации 2009–2016 гг.) и Марксовского района Саратовской области площадью порядка 700 км² (для сезона вегетации 2012 г.).

Ключевые слова: моделирование, тематическая обработка спутниковых данных, влагозапасы почв, суммарное испарение, транспирация, температура подстилающей поверхности, осадки, листовой индекс, проективное покрытие, эффективность орошения, пространственно-временной анализ

Одобрена к печати: 08.12.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136

Введение

Получение адекватного представления о процессах влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой возможно путём воспроизведения водного и теплового режимов таких участков с помощью физико-математических моделей названных процессов (LSM — Land Surface Models). В работе использовались две LSM — модели SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer) (Кучмент и др., 1989; Kuchment, Startseva, 1991; Музылев и др., 2002, 2005) и SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) (Зейлигер и др., 2016а–в, 2017; Zeyliger et al., 2013, 2015, 2016). Эти модели предназначены для расчётов влагосодержания почвы, испарения с подстилающей поверхности (ПП) и других характеристик водного и теплового режимов, причём качество результатов таких расчётов в значительной мере определяется структурой моделей и их уравнениями, используемыми параметризациями процессов влаго- и теплопереноса, возможностью учёта пространственной изменчивости характеристик ПП и метеорологических характеристик, полнотой обеспечения моделей данными наблюдений для оценки параметров, входных переменных, калибровки и верификации. Краткий обзор таких моделей и библиография представлены, например, в нашей работе (Startseva et al., 2014), см. также обзоры (Andreassian et al., 2006; Chen et al., 2005; Gowda et al., 2008; Moehrlen, 1999; Overgaard et al., 2006; Pitman, 2003). Решающим фактором для успешной реализации моделей является использование в них данных дистанционного зондирования со спутников и беспилотных летательных аппаратов, содержащих независимую информацию разных пространственных масштабов о характеристиках ПП и метеорологических характеристиках (см., например, (Ceron et al., 2015; Goodrich et al., 2000; Karimi, Bastiaanssen, 2015; Khanbilvardi et al., 2014; Liou, Kar, 2014; Serban et al., 2010; Xia et al., 2016)). Привлечение этих данных обеспечивает детализацию результатов расчётов характеристик водного и теплового режимов и приводит к существенному повышению их точности (Зейлигер, 2016; Зейлигер, Ермолаева, 2016а-в; Музылев и др., 2002, 2005, 2010, 2015, 2016; Anderson et al., 2015; Gelfan et al., 2012; Muzylev et al., 2017; Startseva et al., 2014; Taconet et al., 1986; Zeyliger, Ermolaeva, 2016, 2017).

Сказанное выше определило цели настоящей работы — исследование и проверку возможностей использования в LSM оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик, полученных по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA (1997–2016), MODIS/EOS Terra и Aqua (2000–2016), SEVIRI/Meteosat-9, -10 (2009–2016), MCУ-MP/«Метеор-М» №2 (2015–2016), а также оценок влажности поверхности почвы по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-A,-B (2014–2016). В настоящем исследовании описаны новые, а также разработанные ранее и усовершенствованные методы и технологии тематической обработки спутниковых данных и построения упомянутых оценок, а также процедуры их использования в моделях. По данным AVHRR и MCУ-MP были получены оценки осадков, вегетационного индекса NDVI, проективного покрытия растительностью В и листового индекса LAI, температуры T_g и излучательной способности Е поверхности почвы, температуры воздуха на границе растительного покрова, принимаемой за температуру растительности T_a , эффективной температуры подстилающей поверхности (ТПП) (взвешенной линейной комбинации T_g и T_a) $T_{s.eff}$. По данным MODIS были получены оценки NDVI, E, B, LAI и ТПП T_k , а по данным SEVIRI — оценки осадков, NDVI, E, B, LAI, ТПП T_i и T_a .

Исследования проводились на примере нескольких территорий, находящихся в лесостепной и степной зонах России: водосбора р. Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км² (для сезонов вегетации 1997—2008 гг.); части Центрально-Чернозёмного региона России (ЦЧР), включающей семь её областей общей площадью 227 300 км² (для сезонов вегетации 2009—2016 гг.) и Марксовского района Саратовской области площадью порядка 700 км² (для сезона вегетации 2012 г.). На исследуемой территории части ЦЧР находятся 48 агрометеорологических станций, данные измерений которых использовались при моделировании. Местоположение этих станций показано на *рис. 1*.



Рис. 1. Расположение агрометеорологических станций на исследуемой территории части ЦЧР

Краткое описание LSM

Используемые в настоящем исследовании LSM, результаты их проверки и применения описаны в работах (Зейлигер, Ермолаева, 2016а-г; Музылев и др., 2002, 2005, 2010, 2015; Gelfan et al., 2012; Startseva et al., 2014; Zeyliger, Ermolaeva, 2013, 2016, 2017), здесь упомянем лишь их важнейшие черты. Основу LSM 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, а также полуэмпирические формулы для расчёта испарения с поверхности почвы и транспирации, уравнения теплового баланса для почвы и растительности, из которых определяются, соответственно, температуры их поверхностей T_g и T_f , и уравнение для длинноволновой части радиационного баланса, при использовании которого рассчитывается радиационная ТПП T. Входными переменными моделей являются температура, влажность воздуха и атмосферное давление, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация, значения которых определяются по данным стандартных сетевых срочных (трёхчасовых) 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 ЦЧР. Различия свойств ПП и метеоусловий учитываются в модели путём 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 (см. выше).

Описание методов оценки характеристик растительности и метеорологических характеристик по спутниковым данным

Первой характеристикой, оценки которой по данным ИСЗ использовались нами при моделировании, была ТПП (Muzylev et al., 2001). Она была получена по данным измерений AVHRR/NOAA в диапазоне 10,5-12,5 мкм при отсутствии облачности с помощью регрессионного алгоритма метода «расщеплённого окна прозрачности» (РОП) (Успенский, 1992; Успенский, Щербина, 1996; Becker, Li, 1995; Uspensky, Shcherbina, 1998; Valor, Caselles, 1996), где предикторами являлись радиационные температуры в каналах 4 и 5 AVHRR и их разности, а также излучательные способности ПП Е. Отметим, что для построения оценок ТПП с низкой погрешностью требовалось определять с высокой точностью значения Е, которые были получены с использованием эмпирических связей между Е и NDVI или В (Valor, Caselles, 1996; Van de Griend, Owe, 1993). Для оценки ТПП на некоторой территории вводилась эффективная температура $T_{s.eff} = BT_{sv} + (1 - B)T_{sg}$, где T_{sv} и T_{sg} – радиационные температуры на верхней границе растительности и почвы. При сделанных допущениях $T_g = T_{sg}$ и $T_{sv} = T_a$, где T_a — температура воздуха на уровне растительного покрова, $T_{s.eff}$ рассчитыва-лась по формуле: $T_{s.eff} = BT_a + (1 - B)T_g$. Среднеквадратические отклонения (СКО) оценок T_a , T_g и $T_{s.eff}$ по данным AVHRR от их значений, определявшихся по данным измерений на шести агрометеорологических станциях Курской области (1997–2008) и на 48 станциях ЦЧР (2009-2016), составили, соответственно, 2,0-2,6; 3,5-4,8 и 2,2-3,5 °С. Для оценки В по каждому пикселу использовалось выражение $B = (NDVI - NDVI_{o})/(NDVI_{v} - NDVI_{o})$, где $NDVI_{v}$ и NDVI₂ — вегетационные индексы для растительности и голой почвы, определявшиеся как максимальное и минимальное значения NDVI в пределах изображения. Оценки LAI производились на основе его эмпирических зависимостей от NDVI: $LAI = NDVI \times 1.71 + 0.48$ для травянистой растительности (Biospheric Aspects..., 1993); LAI = $-2,5\ln(1,2-2\text{NDVI})$ для сельскохозяйственных культур (Biftu, Gan, 2001). Эти оценки сравнивались со значениями LAI, определявшимися при использовании данных фитометрических наблюдений на агрометеорологических станциях Курской области за сезоны вегетации 1997–2008 гг. (с привлечением аналогичных данных за 1970–1991 гг.). Также для нескольких станций Курской области и ЦЧР, соответственно, для 1997–2008 и 2009–2016 гг. производилось сопоставление временных ходов LAI, построенных по спутниковым и наземным данным. Временной ход спутниковых оценок LAI отличался отсутствием скачкообразных изменений, характерных для моментов

скашивания растений, что может быть обусловлено генерализацией спутниковой информации даже в пределах пиксела.

Оценки ТПП T_{ls} , E, NDVI, LAI для названных территорий за сезоны вегетации 2004– 2016 гг. были также получены по данным радиометра MODIS/EOS Terra и Aqua с веб-сайта NASA http://daac.usgs.gov. C него были загружены два вида оценок T_{ls} : продукты MOD11B1 на квазирегулярной сетке с разрешением ~4,8 км и продукты MOD11_L2 с разрешением ~1 км. Разрешение оценок NDVI и LAI, получаемых один раз в восемь дней, составляет 1 км. Достоверность оценок NDVI и LAI, получаемых один раз в восемь дней, составляет с данными квазисинхронных пространственно совмещённых наземных метеорологических наблюдений, а также с аналогичными оценками за отдельные сроки тех же сезонов вегетации, построенными по данным AVHRR. Оказалось, что CKO оценок T_{ls} (MOD11B1) для большинства сроков меньше по величине CKO оценок T_{ls} (MOD11_L2). CKO оценок T_{ls} (MODIS) от значений температур, измеренных на метеостанциях, не превышали 3,5 °C, максимальные разности оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s.eff}$ (AVHRR) лежали в диапазоне 2,0–3,0 °C, а оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s.eff}$ (AVHRR). Значения LAI (MODIS), как правило, были больше значений LAI (AVHRR), но при этом надо иметь в виду, что «мгновенные» оценки LAI (AVHRR) сравнивались с оценками LAI (MODIS), усреднёнными за период в восемь дней.

Возможности получения оценок ТПП существенно расширились после начала приёма в 2008 г. информации с геостационарного спутника Meteosat-9 (а с 2013 г. и с Meteosat-10) с частотой измерений один раз в 15 мин при использовании оригинальной методологии определения ТПП Т_к и Е в светлое и тёмное время суток при отсутствии облачности по данным измерений радиометром SEVIRI в 9-м и 10-м каналах (10,8 и 12,0 мкм, соответственно) яркостной температуры за три последовательных срока (Соловьев, Успенский, 2009; Соловьев и др., 2010а, б). Предложенный подход основывается на комбинации двух известных методов: «расщеплённого окна прозрачности» (РОП) (Wan, Dozier, 1996) и «метода двух температур» (Faysash et al., 2000) с применением гипотезы о постоянстве значений излучательной способности E₉ и E₁₀ в течение временного интервала между первым и последним циклами съёмки. Необходимо отметить, что в отличие от подобного же метода (Product User Manual, 2008) настоящий метод не требует точного задания значений Е в каналах РОП. С 2009 г. данная методология используется для получения оценок T_{ls} на территории ЦЧР. Пример картирования T_{ls} для этой территории на один из дней сезона вегетации 2011 г. приведён на *рис. 2.* Валидация оценок T_{ls} проводилась путём сравнения их с аналогичными независимыми синхронными пространственно совмещёнными оценками, получаемыми в LSA SAF — Прикладном спутниковом центре анализа данных о земной поверхности (Лиссабон, Португалия) (Product User Manual, 2008). СКО полученных оценок T_{ls} лежали в диапазоне 0,9-3,0 °C, причём за счёт исключения систематического смещения они могли быть уменьшены до 2,4 °С. Дополнительная валидация оценок T_{ls} проводилась при их сравнении с оценками T_{ls} (MODIS) (СКО порядка 3,0 °С). По данным ŠEVIRI проводились также оценки ТПП T_a. В методе их построения (Успенский и др., 2011) использовалась линейная регрессионная модель, позволявшая получать оценки T_a по спутниковым данным о T_{ls} , зенитном угле Солнца и высоте земной поверхности. Валидация оценок T_a была выполнена по данным стандартных срочных наблюдений на 48 агрометеорологических станциях ЦЧР за сезоны вегетации 2008-2009 гг. Расчёт статистической погрешности данных оценок показал, что систематическое смещение равно нулю, а СКО даёт значения 1,9-2,1 °С. Таким образом, достоверность данного метода оценки T_a оказалась близкой к достоверности метода, описанного в статье (Good, 2009).

Оценки В и LAI по данным SEVIRI/Meteosat получают по информации в каналах 0,6; 0,8 и 1,6 мкм при отсутствии облачности, причём вначале оценивается величина В, а затем с помощью соотношения $B = 1 - \exp(k \cdot LAI)$ строится оценка LAI. По результатам многочисленных валидационных экспериментов погрешности определения В и LAI по данным SEVIRI не превосходят, соответственно, для B = 0,5 - 20% и для LAI = 1,5 — 40% При диапазонах изменчивости В (0–100%) и LAI (0–10) общая погрешность определения В и LAI не превышает, соответственно, 10 и 15%. Оценки В и LAI включены в состав оперативно распространяемых выходных продуктов LSA SAF, они проводятся ежедневно с пятидневным усреднением (за предшествующие четыре дня и текущий день) и попиксельным разрешением.



Рис. 2. Температура подстилающей поверхности ТПП, рассчитанная по модели по данным срочных трёхчасовых наземных наблюдений $T_s(a)$, определённая по данным AVHRR $T_{s.eff}$ (AVHRR) (δ) и SEVIRI T_{ls} (SEVIRI) (e); и разности $T_{s.eff}$ (AVHRR) – T_{ls} (SEVIRI) (e), $T_s - T_{ls}$ (AVHRR) (∂), $T_s - T_{ls}$ (SEVIRI (e) на 15 ч 01.06.2011 г. (время местное)

По данным AVHRR и SEVIRI были также получены оценки суточных и месячных сумм осадков для территории ЦЧР за сезоны вегетации 2011–2016 гг. Эти оценки были проведены с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации её типов, а также выделения зон осадков и определения их мгновенной максимальной в границах пиксела интенсивности (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013, 2014; Волкова и др. 2015). В основу КПМ положен переход от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных сумм. Величины осадков определяются из уравнений регрессии, где в качестве предикторов используются данные измерений AVHRR (в пяти каналах) и SEVIRI (в 11 каналах) и их разности. Алгоритм расчёта осадков разработан в двух вариантах: «климатическом» — с коэффициентами, имеющими постоянные значения, полученные для той же месячной выборки, по которой рассчитываются суммы осадков, и «оперативном» — с коэффициентами, принимающими значения, непрерывно меняющиеся и зависящие от номера календарного дня. Проверка корректности оценки величин осадков по данным AVHRR и SEVIRI с помощью КПМ проводилась при сравнением их с данными наблюдений на агрометеорологических станциях региона. Вероятность определения по спутниковым данным зон осадков, совпадавших с фактическими, составила 75-85% (Волкова, 2013, 2014). Построенные по данным AVHRR и SEVIRI суточные и декадные суммы осадков неплохо согласуются между собой и с данными наземных наблюдений.

Приём в производственном режиме данных измерений аппаратурой МСУ-МР метеорологического ИСЗ «Метеор-М» № 2 позволил строить по этим данным (с августа 2015 г.) оценки NDVI, Е, В и LAI, ТПП и осадков. Попиксельные оценки суточных, декадных и месячных сумм осадков производились так же, как и по данным AVHRR и SEVIRI, при использовании КПМ, модифицированной и специально приспособленной для исследуемой территории под данные МСУ-МР (Волкова, 2016). Величины осадков так же, как и для других спутников, определялись из уравнений регрессии с постоянными для каждого месяца и динамическими коэффициентами. В качестве предикторов в КПМ использовались измерения МСУ-МР в ИК-каналах 3,8; 11 и 12 мкм, а также их разности. Пороговые значения предикторов рассчитывались для каждого пиксела спутникового изображения как функции высоты места над уровнем моря, высоты солнца, номера календарного дня, приземной температуры воздуха при использовании значений параметров облачности и величин осадков, полученных на начальных этапах классификации. Проверка достоверности оценки осадков по данным МСУ-МР производилась при сравнении их вычисленных суточных сумм с аналогичными суммами, определёнными по данным наземных наблюдений, и с результатами расчётов по данным AVHRR и SEVIRI. Вероятность определения по данным MCУ-MP зон осадков, совпадавших с фактическими, составила, как и для данных AVHRR и SEVIRI, 75-85%. На рис. 3 для сезона вегетации 2016 г. представлен временной ход декадных сумм осадков, определявшихся при наземных наблюдениях и по данным MCУ-MP, SEVIRI и AVHRR.



Рис. 3. Суммы осадков за декаду на агрометеорологической станции Готня для сезона вегетации 2016 г.: измеренные (1) и определённые по данным SEVIRI (2), MCУ-MP (3) и AVHRR (4)



Рис. 4. Суточные суммы осадков (мм) для 22 июня 2016 г., рассчитанные по данным MCУ-MP/«Метеор-М» № 2 (*a*, *б*) и SEVIRI/Meteosat-10 (*в*), (*г*) с помощью КПМ в «климатическом» (*a*, *в*) и «динамическом» (*б*, *г*) вариантах. В кружочках с использованием цветовой шкалы показаны значения суточных сумм осадков по наблюдениям на агрометеорологических станциях. Линии сетки для территории 49–55° с. ш. и 30–45° в. д. нанесены через 5° (*a*, *б*) и 1° (*в*, *г*)



Рис. 5. Суточные суммы осадков (мм) для исследуемой территории части ЦЧР за 20 мая 2016 г., определённые по данным наземных наблюдений (*a*), данным SEVIRI (*б*) и МСУ-МР (*в*)

Этот временной ход демонстрирует приемлемое совпадение наблюдённого и рассчитанного количества осадков. Некоторое их рассогласование характерно для локальных максимумов, где, по-видимому, проявляется различие пространственных масштабов осреднённых по площади спутниковых и точечных наземных оценок. На *рис. 4* представлено распределение по исследуемой территории суточных сумм осадков на одну из дат сезона вегетации 2016 г., рассчитанных по данным MCУ и SEVIRI с помощью КПМ в обоих вариантах, а на *рис. 5* — аналогичное распределение суточных сумм осадков, определённых по данным наземных наблюдений, данным SEVIRI и MCУ-MP. Оба распределения демонстрируют хорошее совпадение всех результатов расчётов.

К настоящему времени область применения КПМ расширилась — на её основе был разработан вычислительный алгоритм для расчёта температуры, отлаженный на данных AVHRR и SEVIRI для ЦЧР (Волкова, Успенский, 2016) и использовавшийся также для оценки ТПП T_a, T_g , и $T_{s.eff}$ по данным МСУ-МР. Точность оценки температуры при использовании постоянных для каждого месяца коэффициентов регрессии оказалась несколько выше, чем при расчётах с динамическими коэффициентами. Это было особенно заметно при летней жаркой погоде, когда из-за локальных перегревов поверхности почвы во второй половине дня спутниковые оценки опускались ниже наземных. СКО среднесуточных оценок T_a по данным МСУ-МР оказались равными 1,9–2,5 °С, оценок $T_g - 2,0-3,2$ °С и оценок $T_{s.eff} - 1,9-2,8$ °С. Результаты сравнения рассчитанных по модели значений T_s (LST(MODEL)) и оценок ТПП T_{ls} (LST(SEVIRI)) и $T_{s.eff}$ (LST(MCУ-MP) и LST(AVHRR)) за сезоны вегетации 2015 и 2016 гг. для одной из агрометеорологических станций ЦЧР представлены на *рис. 6*.

Результаты использования спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик при моделировании водного и теплового режимов исследуемых территорий

Для усвоения в модели SVAT спутниковых оценок LAI, В, ТПП и осадков были разработаны процедуры замены их значений, определённых по данным наземных наблюдений, на соответствующие значения, рассчитанные по данным ИСЗ при учёте пространственной изменчивости всех названных величин (Музылев и др., 2002, 2005, 2010, 2015, 2016; Gelfan et al., 2012; Startseva et al., 2014). Работоспособность этих процедур была подтверждена при сравнении: 1) временных ходов LAI за сезон вегетации, построенных по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI, MCУ-MP и по наземным данным; 2) рассчитанных по модели значений TПП с их спутниковыми аналогами $T_{s.eff}$, T_{ls} и T_a и данными наземных наблюдений; 3) результатов расчёта по модели влагозапасов по данным всех использовавшихся сенсоров и наземных измерений. Для большинства дней рассматривавшихся сезонов вегетации (1997–2016) различия значений LAI, в превосходили погрешности его оценки по данным SEVIRI (15%); разности значений $T_{s.eff}$ и T_s , T_{ls} и T_s , T_a и T_f и измеренных температур не превышали СКО оценок $T_{s.eff}$ и T_a по данным AVHRR; расхождения значений W и Ev, измеренных на агрометеорологических станциях и рассчитанных для всех вариантов оценки LAI, В, ТПП и осадков, находились в допустимых пределах.

Искомыми результатами расчётов с помощью модели SVAT являются значения влагозапасов почвы W, суммарного испарения Ev, потоков скрытого и явного тепла и других характеристик водного и теплового режимов, ТПП трёх типов, а также распределений температуры и влажности почвы по глубине для территорий Курской области площадью 7460 км² (за сезоны вегетации 1997–2008 гг.) и части ЦЧР площадью 227 300 км² (за сезоны вегетации 2009–2016 гг.). Точность полученных оценок W и Ev подтверждена путём сравнения их с данными наземных измерений, а также с результатами расчётов по модели при всех вариантах оценки LAI, B, $T_{s.eff}$, T_{ls} , T_a и осадков по данным AVHRR/NOAA, MODIS/EOS Terra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10, MCУ-MP/«Метеор-М» № 2. Расхождения оценок Ev за пентаду при всех вариантах расчётов находились в пределах нескольких миллиметров (~20–25%) (*puc. 76*), что считается приемлемым.



Рис. 6. Температура подстилающей поверхности: рассчитанная по модели по данным срочных трёхчасовых наземных наблюдений *T_s* (LST(MODEL)), определённая по данным SEVIRI *T_{ls}*(LST(SEVIRI)), MCУ-MP *T_{s.eff}*(LST(MCY-MP)), AVHRR *T_{s.eff}*(LST(AVHRR)) и измеренная температура воздуха на агрометеорологической станции Богородицкое-Фенино для сезонов вегетации 2015 и 2016 гг.

Погрешность оценки W для подавляющего числа сроков наблюдений названных сезонов вегетации составила 10–15% (*puc. 7в*), что также не превышает общепринятой величины ошибки определения значений W. Все рассчитанные с помощью модели SVAT величины — W, Ev и другие характеристики водного и тёплого режимов исследуемой территории — представлены в виде распределений по её площади. В качестве примера подобного распределения на *puc. 8а–в* изображены поля значений W, рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений, данным SEVIRI и MCУ-MP для территории ЦЧР на одну из дат сезона вегетации 2016 г., а на *puc. 8г-д* для того же дня показаны распределения разностей попарно взятых значений W. Как видно из двух последних рисунков, погрешности представленных оценок W находятся в указанных выше пределах.



Рис. 7. Осадки (*a*), суммарное испарение *Ev* (*б*), рассчитанное по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (1), SEVIRI (2), MCУ-MP (3) и AVHRR (4) и влагозапасы метрового слоя почвы *W* (*в*), рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (5), SEVIRI (6), MCУ-MP (7), AVHRR (8) и измеренные (9) на агрометеорологической станции Готня для сезона вегетации 2016 г.



Рис. 8. Влагозапасы метрового слоя почвы W (мм) на 12 июля 2016 г., рассчитанные по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений W(H) (*a*), по данным SEVIRI W(S) (*б*), MCУ-MP W(M) (*в*) и разности W(H) - W(S) (*г*) и W(H) - W(M) (*д*) для исследуемой территории части ЦЧР

Результаты использования спутниковых оценок характеристик составляющих эвапотранспирации при моделировании водного и теплового режимов территорий орошаемого земледелия

Одними из важных продуцентов водяного пара на суше являются агроценозы. Для получения на них высоких и устойчивых урожаев в практике земледелия для создания необходимых для этого оптимальных условий применяются разнообразные агротехнические и агромелиоративные методы и приёмы управления водным, тепловым и питательным режимом. С этой целью проводится планирование управления агроценозами, для чего используются данные наземных измерений, наблюдений и обследований. Данные такого рода, основанные на локальном точечном отображении ситуации, несут в себе значительную долю пространственной неопределённости. Их применение для управления ростом и развитием отдельного агроценоза на всём его пространстве требует проведения наземных геореференцированных измерений. Пространственная параметризация такого рода данных позволяет получать картограммы требуемых параметров, отображающих соответствующие пространственные распределения. Для применения получаемых картограмм параметров в практику земледелия с использованием известных агротехнических и агромелиоративных методов составляются технологические карты, лежащие в основе так называемой технологии точного (координатного) богарного и (дифференцированного) орошаемого земледелия (Зейлигер, 2010; Зейлигер и др., 2012). Эти технологии направлены на перенос применяемых в земледелии

технологий, а также опыта и знаний с традиционного уровня восприятия характеристик отдельного агроценоза, как пространственно однородного объекта, на уровень пространственно неоднородного объекта с распределёнными по его пространству характеристиками. С этой целью разрабатываются новые технологии площадной параметризации агроценозов, позволяющей планировать и осуществлять соответствующее управление с использованием современной сельскохозяйственной техники, способной реализовывать дифференцированные по пространству поля агротехнические и агромелиоративные приёмы и воздействия. Одним из таких примеров является картирование влагозапасов почвенно-грунтового слоя с использованием технологии прокси зондирования (Зейлигер, Тулузаков, 2013).

Важной особенностью орошаемого земледелия является оценка текущих запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвы и её использования агроценозами, а также краткои среднесрочный прогноз изменения этих характеристик в соответствии с получаемыми метеопрогнозами. Одним из инструментов составления такого прогноза являются агрогидрологические модели типа SWAP, позволяющие проводить численное моделирование процессов влаго- и теплопереноса в системе почва-вода-атмосфера-растение. Эти модели, являющиеся, как и SVAT-модели, одной из разновидностей LSM, в отличие от них ориентированы на детализацию описания процессов водопотребления агроценозов с его дифференциацией как по видам сельскохозяйственных культур, так и по фазам их вегетационного развития. В связи с этим ведутся исследования по применению SWAP-моделей для агрогидрологического моделирования с использованием данных дистанционного зондирования ТПП на уровне поля и его отдельных контуров (Зейлигер, Ермолаева, 2016г; Zeiliger, Ermolaeva, 2013, 2016). В первом случае используются преимущественно данные, получаемые с сенсоров, установленных на космических платформах (Rwasoka et al., 2011), а во втором — на воздушных (Elhaddad et al., 2011).

Одним из значимых параметров, характеризующих рост и развитие посевов сельскохозяйственных культур, является их эвапотранспирация. В противоположность многочисленным традиционным методам её точечной оценки в результате большого числа исследований были разработаны методы, основанные на совместном использовании данных дистанционного зондирования Земли и данных метеорологических наблюдений. Оценки составляющих эвапотранспирации применяются для мониторинга эвапотранспирации агроценозов (Зейлигер, Ермолаева, 2016а, в; Bahir et al., 2017; Bastiaanssen et al., 1998, 2005; Bezerra et al., 2015; Diarra et al., 2017; Elhaddad et al., 2011; French et al., 2015; Rwasoka et al., 2011; Su et al., 2005), оценки их урожайности (Зейлигер, Ермолаева, 20166; Zeiliger, Ermolaeva, 2016), оценки влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы (Leng et al., 2017), оценки водоэффективности орошаемых агроценозов (Зейлигер Ермолаева, 20146; Zeiliger, Ermolaeva, 2013), а также влияния природных и антропогенных воздействий на агрогидрологические процессы (Зейлигер, Ермолаева, 2014а, 2015; Зейлигер и др., 2015) и для поддержки принятия решений при управлении орошением (Зейлигер, Ермолаева, 2016г; Zeiliger, Ermolaeva, 2017).

Для оперативного контроля и управления орошением посевов сельскохозяйственных культур с использованием модели SWAP требуются ряды данных потока суточной эвапотранспирации. Наиболее подходящими для этого являются данные радиометров MODIS Terra и Aqua, позволяющие рассчитывать эвапотранспирацию с суточной периодичностью (Bastiaanssen et al., 1998). Для практического использования данных MODIS разработаны и регулярно совершенствуются алгоритмы обработки первичных данных съёмки. Для расчёта суточных растров потоков эвапотранспирации по данным первого уровня обработки в геоинформационной среде ILWIS на основе метода SEBS (Su et al., 2005) был разработан компьютерный код, с помощью которого для части территории Марксовского района Саратовской области на период весенне-летних месяцев 2012 г. были рассчитаны суточные картограммы, представленные на *рис. 9* в виде агрегированных 7,5-суточных картограмм.

Пространственный экстент представленных на *рис. 9* картограмм включает часть р. Волги, населённые пункты и приусадебные хозяйства, дорожно-транспортную сеть, а также земли богарного и орошаемого земледелия. Там же синей линией показана трасса первой очереди магистрального канала Приволжской оросительной системы, по которому вода забирается из р. Волги и подаётся насосными станциями на дождевальные машины кругового действия, отображаемые овалами.



Рис. 9. Картограммы рассчитанных 7,5-суточных объёмов эвапотранспирации за период май-август 2012 г. для территории первой очереди Приволжской ОС (Марксовский район, Саратовская область)



Рис. 10. Картограмма значений коэффициента пропорциональности линейного уравнения тренда, рассчитанных по временным рядам суммарного испарения, а также полученных по данным MODIS за 2000–2010 гг.

Цветовая палитра классификации объёмов эвапотранспирации позволяет анализировать пространственную динамику эвапотранспирации, тесно связанную с изменением запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвы, зависящих от метеорологических условий, водопотребления растительного покрова и проведения поливов посевов сельскохозяйственных культур.

В результате наложения слоя эвапотранспирации на слой контуров орошаемых полей прослеживается совпадение контуров наибольших значений эвапотранспирации в поливной период с их границами. Аналогично (для середины июня, всего июля и первой половины августа) прослеживаются контуры с низкими значениями эвапотранспирации, находящиеся в центральной части картограмм, между орошаемыми землями. Эти контуры расположены на землях богарного земледелия, а также деградированных землях, и поэтому выведенных из сельскохозяйственного оборота. Значения потоков эвапотранспирации на этих землях последовательно снижались с середины мая после выпадения обильных осадков вплоть до середины августа, когда снова выпали обильные осадки. Между этими эпизодами на картограммах прослеживается некоторое увеличение эвапотранспирации после выпадения небольших по объёму осадков в конце июня и середине июля.

На втором этапе оценки пространственно-временных изменений испарения были рассчитаны попиксельные статистические показатели тренда временных рядов величин суммарного испарения за тёплые периоды. В результате этого анализа были получены попиксельные значения параметров линейного уравнения тренда для территории Марксовского района Саратовской области. На *рис. 10* представлена картограмма попиксельных значений коэффициента пропорциональности линейного уравнения временного тренда суммарного испарения, полученных по данным MODIS Terra за период 2000–2010 гг. На эту картограмму наложен слой функционировавших в 2010 г. на территории Приволжской оросительной системы дождевальных машин, оцифрованных с использованием снимка со спутника RapidEye. Анализ обоих слоёв показывает наличие пространственной связи между местами расположения дождевальных машин, действовавших в 2010 г. на территории первой очереди Приволжской оросительной системы, с местами рассчитанных положительных трендов суммарного испарения за период 2000–2012 гг.

Анализ распределения направленности изменения величин суммарного испарения на исследованной территории (см. *рис. 10*) показывает общий отрицательный тренд изменения

этого параметра, что может быть одним из проявлений флуктуации климатических характеристик. Однако при наличии такого тренда имеются зоны двух типов с отличным от общего поведением. Места расположения зон первого типа с отрицательным трендом испарения (красный цвет) в основном совпадают с местами расположения сельскохозяйственных полей в районе Комсомольской ОС, где в конце 2000-х гг. орошение было прекращено практически на всех полях вдоль магистрального канала. Эти зоны расположены преимущественно вдоль магистрального канала Комсомольской оросительной системы (см. вверху рис. 10), магистрального канала второй очереди Приволжской оросительной системы (в центре нижней части этого же рисунка), а также на территории первой очереди Приволжской оросительной системы (в левой нижней части этого рисунка). Места расположения зон второго типа, имеющих положительный тренд величин суммарного испарения (зелёный цвет), в основном совпадают с расположением сельскохозяйственных полей в районе магистрального канала. В этих местах в конце 2000-х гг. происходила замена дождевальных машин, а также ввод в действие дождевальной техники на сельскохозяйственных полях, где ранее было прекращено орошение. Именно эти обстоятельства нашли своё отражение в увеличении величин суммарного испарения, что было подтверждено результатами проведённого анализа.

Совмещение результатов спутниковых и наземных исследований позволило разработать методику оценки эффективности орошения посевов сельскохозяйственных культур, (Зейлигер, 2016; Зейлигер, Ермолаева, 2016б, в; Zeiliger, Ermolaeva, 2013, 2017). Для этого в вегетационный период 2012 г. на полях ряда хозяйств (ЗАО «Волга», ЗАО «Мелиоратор» и ЗАО «Трудовой»), занятых орошаемыми посевами кормовых сельскохозяйственных культур и находящихся на территории первой очереди Приволжской оросительной системы, были проведены подспутниковые полевые эксперименты. В результате этих экспериментов были собраны сведения о сроках поливов и оросительных нормах на полях, занятых орошаемыми посевами сельскохозяйственных культур, а также данные об их урожайности. Параллельно была проведена обработка информации, получаемой с помощью MODIS для данных участков внутри контуров этих полей. По величинам суточных объёмов транспирации с территорий, занятых орошаемой люцерной, были рассчитаны соответствующие временные ряды и интегральные значения объёмов транспирации за период орошения.

Собранные данные были использованы для расчётов по модели SWAP агрогидрологических параметров водного режима посевов люцерны, в том числе коэффициента водного стресса. Последняя величина представляет собой отношение текущей эвапотранспирации к оптимальной, рассчитываемой по методике ФАО-56, и характеризует отличие текущего водного режима корнеобитаемого слоя почвы от оптимального для данной сельскохозяйственной культуры в зависимости от фазы её развития и погодных условий. Временные ряды суточных значений метеорологических характеристик, сроков и норм поливов, а также коэффициента водного стресса, рассчитанные для семидневных интервалов времени для посевов люцерны, представлены на рис. 11. Эти данные свидетельствуют об отличии водного режима исследованных посевов люцерны, сформированных в результате выпадения осадков и проведения поливов, что в первую очередь связано с различием почвенных и гидрологических условий, своевременностью проведения поливов, а также с их количественными и качественными показателями. Для оценки влияния водных режимов посевов люцерны на их урожайность были использованы данные по урожайности зелёной массы, а также рассчитанные средние за сезон значения коэффициентов водного стресса, представленные на рис. 12а. Вычисленные интегральные значения транспирации были задействованы для расчёта коэффициента эффективности использования поливной воды каждым посевом орошаемой люцерны. Результаты расчёта этого показателя (представляющегося отношением величины интегральной транспирации к величине оросительной нормы, поданной на эти поля) за период орошения (май-август 2012 г.) представлены на рис. 126. Изображённые на рис. 12 эмпирические зависимости, связывающие урожайность посевов орошаемой люцерны с коэффициентами водного стресса и водоэффективности орошения, демонстируют принципиальную возможность использования данных космического мониторинга и агрогидрологического моделирования для оценки эффективности использования поливной воды при выращивании посевов орошаемых сельскохозяйственных культур.

Е.Л. Музылев, З.П. Старцева, А.Б. Успенский, Е.В. Волкова, Е.В. Василенко, А.В. Кухарский, А.М. Зейлигер и др.



Рис. 11. Агрогидрологические характеристики посевов орошаемой люцерны ЗАО Трудовой и ОПХ ВолжНИИГиМ в вегетационный период 2012 г.: *а* — температура воздуха; *б* — суммарное испарение; *в* — осадки и орошение; *г* — коэффициент водного стресса



Рис. 12. Урожайность органического углерода посевов орошаемой люцерны за вегетационный период 2012 г. на полях Саратовского Заволжья, как функции: *a* — средних значении коэффициентов водного стресса; *б* — коэффициента эффективности использования поливной воды

Использование данных скаттерометра ASCAT для оценки влажности поверхности почвы

После запуска в 2013 г. спутника MetOp-B с установленным на борту скаттерометром ASCAT — аппаратурой активного зондирования подстилающей поверхности на частоте 5,2 ГГц (СВЧ-диапазон) — появилась возможность оценки влажности поверхности почвы в её динамике на обширной территории. Результаты измерений ASCAT выражаются в процентах от 100 до 0, соответственно, при полном насыщении почвы влагой или при её отсутствии. Полученные оценки преобразуются в объёмные влажности верхнего слоя почвы (0-3 см) в см³/см³ при умножении на значения пористости. Проверка точности данных оценок проводилась при их сравнении с результатами расчётов влажности поверхности почвы с помощью модели SVAT, выполненных при использовании данных наземных наблюдений (рис. 13). Как видно из рисунка, для большей части территории ЦЧР расхождения спутниковых и модельных оценок поверхностной влажности находились в допустимых преде $nax(\pm 0.05 \text{ см}^3/\text{см}^3)$. Такая корректность данных ASCAT позволяет использовать их в модели SVAT при задании начальных условий для уравнения вертикального влагопереноса в почве. Так, замена начальных профилей влажности почвы при её полном насыщении на профили, определённые по значению влажности, полученному по данным ASCAT на время начала расчёта, приводит к повышению точности оценки с помощью модели значений влажности поверхности почвы (*puc. 146*) и её влагозапасов (Muzylev et al., 2017). Полученные по данным ASCAT значения поверхностной влажности использовались также для расчёта с помощью модели значений испарения с поверхности почвы и последующего формирования верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве (как известно, интенсивность испарения с почвы зависит от влажности её поверхности). В стандартной процедуре расчёта профиля влажности почвы и влагозапасов с помощью модели значение влажности почвы на поверхности берётся с предыдущего шага по времени. В настоящем расчёте используются значения поверхностной влажности, определяемые по данным ASCAT.



Рис. 13. Распределение по площади ЦЧР значений влажности поверхности почвы, определённой по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-B в относительных (*a*) и объёмных (см³/см³) единицах (*б*), рассчитанной по модели при использовании данных наземных измерений (*в*) и их разности (*г*) на 9 августа 2016 г.



Рис. 14. Осадки (*a*), влажность верхнего 3-см слоя почвы (*б*): определённая по данным измерений ASCAT/MetOp (1), рассчитанная по модели с начальным профилем влажности почвы при её полном насыщении (2) и при его задании по значению влажности, полученному по данным ASCAT на время начала расчёта (3); влагозапасы метрового слоя почвы (*в*) — рассчитанные с помощью модели по данным наземных наблюдений (4) и при задании верхнего граничного условия в уравнении влагопереноса по данным ASCAT (5), измеренные (6). Агрометеорологическая станция Орел, сезон вегетации 2016 г.

В качестве примера на *рис. 14в* для одной из агрометеорологических станций ЦЧР представлены временные ходы влагозапасов метрового слоя почвы за сезон вегетации 2016 г., рассчитанных по модели с верхним граничным условием для уравнения влагопереноса, задаваемым по данным наземных измерений и по данным ASCAT.

Представленные результаты привлечения данных ASCAT при моделировании влажности почвы являются предварительными. Описанное направление исследований, в котором используются спутниковые данные, получаемые с помощью современной аппаратуры независимо от погодных условий, представляется перспективным и требующим дальнейшего развития.

Заключение

Проведённые исследования показали эффективность использования оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик, полученных по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA (1997–2016), MODIS/EOS Terra и Aqua (2000–2016), SEVIRI/Meteosat-9, -10 (2009–2016), MCУ-MP/«Метеор-М» № 2 (2015–2016), а также оценок влажности поверхности почвы по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-A, -В (2014–2016), в модели влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой LSM (Land Surface Model). Отметим основные результаты настоящего исследования:

- разработаны новые или усовершенствованы существовавшие методы и технологии тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR, MODIS, SEVIRI, MCУ-MP и построения оценок характеристик растительного покрова, температуры подстилающей поверхности и осадков. Все технологии адаптированы к территории части Центрально-Чернозёмного региона (ЦЧР) России площадью 227 300 км²;
- разработаны процедуры использования в модели спутниковых оценок названных характеристик при учёте пространственной неоднородности их полей. Проведённые проверки функционирования модели подтвердили корректность применения данных процедур;
- с помощью разработанной LSM (версия SVAT) выполнены расчёты влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов территории исследуемых территорий Курской области за сезоны вегетации 1997–2008 гг. и части ЦЧР за сезоны вегетации 2009–2016 гг. Значения всех рассчитанных величин представлены в виде распределений по площади данных территорий, при этом погрешности их оценки находятся в допустимых пределах.
- с использованием разработанного компьютерного кода оценки эвапотранспирации по данным измерений радиометра MODIS выполнены расчёты картограмм суточной эвапотранспирации за вегетационный период 2012 г. на территории первой очереди Приволжской оросительной системы, пространственно-временной анализ которых показал наличие пространственной связи высоких значений эвапотранспирации с местами расположения дождевальных машин;
- линейно-регрессионный анализ временных рядов пиксельных значений растров эвапотранспирации территории Марксовского района Саратовской области по данным радиометра MODIS за период 2000–2009 гг. позволил выявить зоны с положительными и отрицательными трендами суммарной годовой эвапотранспирации за вегетационные периоды, причём эти зоны преимущественно находятся в местах текущего и прошлого размещения дождевальных машин;
- с помощью разработанной LSM (версия SWAP) и данных MODIS выполнены расчёты по оценке оптимальности сформированного в результате проведения поливов водного режима посевов орошаемой люцерны, показавшие наличие корреляционных связей между показателями её урожайности с одной стороны и коэффициентов водного стресса и водоэффективности орошения с другой.

Описанный подход применим при решении широкого круга задач гидрологической и агрогидрологической направленности, таких, как выявление закономерностей процессов формирования водных ресурсов, получение оценок влагообеспеченности территорий, выполнение гидрологического прогноза их состояния на основе данных численного гидрометеорологического прогноза, разработка методики оценки эффективности орошения посевов сельскохозяйственных культур, а также технологии оперативного управления орошением. При этом успешность реализации разработанных LSM для решения таких задач напрямую определяется возможностью ассимиляции спутниковых данных разных спектральных диапазонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-05-01097 «Водопотребление агроценозов на "точечном" и "площадном" уровнях исследований».

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. Определение параметров облачного покрова и осадков по данным МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2016. С. 157.
- 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 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.
- 6. 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.
- 7. Зейлигер А. М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду // Сборник научных докладов ВИМ. 2010. Т. 2. С. 633–638.
- Зейлигер А. М. Управление орошаемым земледелием по данным наземного и космического мониторинга // Шульга Е. Ф., Куприянов А. О., Хлюстов В. К., Балабанов В. И., Зейлигер А. М. Управление сельхозпредприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли. М.: ФГБОУ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016.
- Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2014а) Оценка трендов деградации/проградации растительного покрова сельскохозяйственных земель с использованием данных ДЗЗ // 12-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 10–14 нояб. 2014. 2014. С. 362.
- Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (20146) Оценка эффективности использования поливной воды посевами сельскохозяйственных культур с использованием модели SEBAL // 12-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 10–14 нояб. 2014. С. 363.
- Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. Результаты анализа наборов данных MOD16 ЕТ за 2000–2009 годы для территории Палласовского района Волгоградской области РФ // 13-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 16–20 нояб. 2015. С. 400.
- 12. 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 т. Т. 2. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федер. ун-та, 2016. С. 258–273.
- 13. 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.
- 14. 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 Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2016. С. 352.
- Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2016г) Компьютерный код оценки эвапотранспирации агроценозов по данным ДЗЗ // 14-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2016. 2016. С. 353.
- 16. Зейлигер А. М., Тулузаков М. Л. Электромагнитный индуктометр для вертикального профилирования влагозапасов почвенно-грунтовой толщи // Природообустройство. 2013. № 4. С. 36–40.

- 17. Зейлигер А. М., Фартуков В. А., Косицын А. В. Результаты полевых экспериментов по тестированию технологии дифференцированного дождевания посевов сельскохозяйственных культур // Сборник научных докладов ВИМ. 2012. Т. 2. С. 430–434.
- 18. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Кричевцова А. Н. Результаты пространственно-временного анализа наборов данных ДЗЗ по испарению с поверхности суши MOD16 ЕТ за 2000–2009 годы для территории Палласовского района Волгоградской области РФ // Экология. Экономика. Информатика: сб. ст. В 3 т. Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федер. ун-та. 2015. С. 35–48.
- 19. *Кучмент Л. С., Мотовилов Ю. Г., Старцева З. П.* Моделирование влагопереноса в системе почварастительность-приземный слой атмосферы для гидрологических задач // Водные ресурсы. 1989. № 2. С. 32–39.
- 20. *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.
- 21. *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.
- 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.
- 23. *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.
- 24. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б., Василенко Е.В., Волкова Е.В., Кухарский А.В. Использование спутниковых данных о характеристиках растительного покрова, метеорологических характеристиках и влажности поверхности почвы в модели формирования водного и теплового режимов обширной территории сельскохозяйственного назначения // 14-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2016. С. 363.
- 25. *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.
- 26. *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.
- 27. *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.
- 28. Успенский А.Б. Об оценке температуры поверхности суши по данным спутниковых измерений уходящего ИК излучения в диапазоне 10,5-12,5 мкм // Метеорология и гидрология. 1992. № 10. С. 19–27.
- 29. 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.
- 30. 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. Санкт-Петербург, июнь 2011. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. С. 37–38.
- Anderson R. G., Lo M.-H., Swenson S., Famiglietti J. S., Tang Q., Skaggs T. H., Lin Y.-H., Wu R.-J. Using satellite-based estimates of evapotranspiration and groundwater changes to determine anthropogenic water fluxes in land surface models // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8. P. 3021–3031.
- Andreassian V., Bergström S., Chahinian N., Duan Q., Gusev Y. M., Litllewood I., Machevet T., Michel C., Montanary A., Moretti G., Moussa R., Nasonova O. N., O'Connor K., Paquet E., Perrin C., Rousseau A., Schaake J., Wagener T., Xie Z. Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005 // Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX / eds. Andreassian V., Hall A., Chahinian N., Shaake J. IAHS Publ., 2006. No. 307. P. 41–93.
- 33. Bahir M., Boulet G., Olioso A., Rivalland V., Gallego-Elvira B., Mira M., Rodriguez J.-C., Jarlan L., Merlin O. Evaluation and Aggregation Properties of Thermal Infra-Red-Based Evapotranspiration Algorithms from 100 m to the km Scale over a Semi-Arid Irrigated Agricultural Area // Remote Sensing. 2017. V. 9. P. 1178.

- 34. Bastiaanssen W. G. M., Menenti M., Feddes R. A., Holtslag A. A. M. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Pt. 1. Formulation // J. Hydrology. 1998. V. 212-213. P. 198–212.
- 35. *Bastiaanssen W.G.M., Noordman E.J.M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B.P., Allen R.G.* SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2005. V. 131. No. 1. P. 85–93.
- Becker F., Li Z.-L. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems // Remote Sensing Rev. 1995. V. 12. P. 225–253.
- 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 // Advanced Remote Sensing. 2015. V. 4. No. 3. P. 234–247.
- 38. *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.
- 39. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS). Report No. 27 / ed. BAHC Core Project Office. Institut für Meteorologie. Freie Universitat Berlin. Germany. 1993. 103 p.
- 40. *Ceron C. N., Melesse A. M., Price R., Dessu S. B., Kandel H. P.* Operational actual wetland evapotranspiration estimation for South Florida using MODIS imagery // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 3613–3632.
- 41. *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.
- Diarra A., Jarlan L., Er-Raki S., Le Page M., Aouade G., Tavernier A., Boulet G., Ezzahar J., Merlin O., Khabba S. Performance of the two-source energy budget (TSEB) model for the monitoring of evapotranspiration over irrigated annual crops in North Africa // Agricultural Water Management. 2017. V. 193. P. 71–88.
- 43. *Elhaddad A.*, *Garcia A.*, *Chavez J. L.* Using a surface energy balance model to calculate spatially distributed actual evapotranspiration // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2011. V. 137. No. 1. P. 17–26.
- 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. Applied Meteorology. 2000. V. 39. P. 971–982.
- 45. *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 Environment. 2015. V. 158. P. 281–294.
- 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. B. Escalante-Ramirez. InTech — Open Access Publisher. Rijeka. Croatia. 2012. Ch. 6. P. 141–176.
- 47. *Good E*. Blending in situ and satellite data for monitoring land air temperatures // Proc. 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Bath, UK, 21–25 Sept. 2009. 2009. 5 p.
- Goodrich D. C., Scott R., Qic J., Goff B., Unkrich C. L., Morana M. S., Williams D., Schaeffer S., Snyder K., MacNish R., Maddock T., Pool D., Chehbouni A., Cooper D. I., Eichinger W. E., Shuttleworth W. J., Kerri Y., Marsett R., Ni W. Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in situ measurements // Agricultural and Forest Meteorology. 2000. V. 105. P. 281–309.
- 49. 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.
- Karimi P., Bastiaanssen W. G.M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting Pt. 1: Review of the accuracy of the remote sensing data // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. V. 19. P. 507–532.
- Khanbilvardi R., Lakhankar T., Krakauer N., Nazari R., Powell A. Remote sensing data and information for hydrological monitoring and modeling: Handbook of Engineering Hydrology: Modeling. Climate Change, and Variability. CRC Press. Taylor and Francis Group, 2014. Ch. 24. P. 503–517.
- 52. *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.
- 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.
- 54. *Liou Y.-A., Kar S. K.* Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms A Review // Energies. 2014. V. 7. P. 2821–2849.
- 55. *Moehrlen C*. Literature review of current used SVAT models: Internal Report 04-99. Department of Civil and Environmental Engineering. University College Cork. Ireland. 1999. 22 p.
- Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B., Volkova E. V. Utilization of AVHRR/NOAA based land surface temperatures in modeling the hydrological cycle of river basins // Proc. Intern. Radar Symp. (IRS-2000). 24–29.07.2000. St. Petersburg. A. Deepak Publishing. Hampton. Virginia. USA. 2001. P. 40–44.
- 57. Muzylev E., Startseva Z., Uspensky A., Volkova E., Vasilenko E., Kukharsky A. Using satellite data on meteorological and vegetation characteristics and soil surface humidity in the Land Surface Model for the vast

territory of agricultural destination // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna. Austria. 24–28 Apr. 2017. V. 19. P. 12725.

- 58. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M. B. Land-surface modeling in hydrological perspective a review // Biogeosciences. 2006. V. 3. P. 229–241.
- 59. *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.
- 60. Product User Manual. Land Surface Temperature (PUM LST). LSA SAF. SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.1. 2008. 49 p.
- 61. *Rwasoka D. T., Gumindoga W., Gwenzi J.* Estimation of actual evapotranspiration using the surface energy balance system (SEBS) algorithm in the Upper Manyame catchment in Zimbabwe // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. 2011. V. 36. No. 14-15. P. 736–746.
- 62. Serban C., Maftei C., Barbulescu A. Assessment of evapotranspiration using remote sensing data and grid computing and application // WSEAS Trans. Computers. 2010. V. 9. No. 11. P. 1245–1254.
- 63. *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.
- Su H., McCabe M., Wood E., Su Z., Prueger J. Modeling evapotranspiration during SMACEX: Comparing two approaches for local- and regional-scale prediction // J. Hydrometeorology. 2005. V. 6. No. 6. P. 910–922.
- 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.
- 66. Uspensky A. B., Shcherbina G. I. Derivation of land surface temperatures and emissivities from satellite IR window measurements // Advances in Space Research. 1998. V. 21. No. 3. P. 433–437.
- 67. *Valor E., Caselles V.* Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas // Remote Sensing Environment. 1996. V. 57. P. 167–184.
- 68. *Van de Griend A.A., Owe M.* On the relationship between thermal emissivity and normalized vegetation index for natural surfaces // Intern. J. Remote Sensing. 1993. V. 14. No. 6. P. 1119–1131.
- 69. *Wan Z.*, *Dozier J.* A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 1996. V. 34. No. 4. P. 892–905.
- Xia T., Kustas W.P., Anderson M. C., Alfieri J. G., Gao F., McKee L., Prueger J. H., Geli H. M. E., Neale C. M. U., Sanchez L., Alsina M. M., Wang Z. Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one- and two-source modeling schemes // Hydrology and Earth System Sciences. 2016. V. 20. P. 1523–1545.
- Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S. SEBAL Model Using to Estimate Irrigation Water Efficiency and Water Requirement of Alfalfa Crop // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna. Austria. 07–12 Apr. 2013. V. 15. P. 12671.
- 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 Apr. 2016. V. 18. P. 13486.
- 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 Apr. 2017. V. 19. P. 15422.

Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories

E. L. Muzylev¹, Z. P. Startseva¹, A. B. Uspensky², E. V. Volkova², E. V. Vasilenko², A. V. Kukharsky², A. M. Zeyliger³, O. S. Ermolaeva³

¹ Water Problem Institute of RAS, Moscow, 119333, Russia E-mail: muzylev@iwp.ru ² State Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow, 123242, Russia E-mail: quantocosa@bk.ru ³ Pureieu State American University MTAA Measure 127550, Pureieu

³ Russian State Agrarian University — MTAA, Moscow 127550, Russia E-mail: azeiliguer@mail.ru

The paper presents the results of utilizing estimates of vegetation and meteorological characteristics obtained from measurements by radiometers AVHRR/NOAA (1997–2016), MODIS/EOS Terra and Aqua (2004–2016), SEVIRI/Meteosat-9, -10 (2009–2016), MSU-MR/Meteor-M No. 2 (2015–2016), and ASCAT/ MetOp-B scatterometer (2014–2016) in physical-mathematical models of water and heat regime formation (SVAT and SWAP) for different agricultural areas for the vegetation season. The developed or refined methods and technologies of thematic processing satellite data and building above estimates are described. The estimated characteristics include normalized difference vegetation index NDVI, vegetation cover fraction B, leaf area index LAI, emissivity E, three types of land surface temperature (LST) (land-surface skin temperature T_g , air foliage temperature T_a , and efficient radiation temperature $T_{s.eff}$ or T_{ls}), precipitation as well as soil surface humidity. LAI and B are model parameters and LST and precipitation are input variables. Their values are introduced into the model. Using the SVAT model, soil water content W, evapotranspiration Ev, vertical heat and moisture fluxes and other water and heat regime characteristics have been calculated for 1997–2016 vegetation seasons. The error of the obtained estimates has been within the permissible limits. It has been also investigated whether the soil surface humidity estimates obtained from the ASCAT/MetOp-B scatterometer data can be used in the SVAT model to determine the initial and upper boundary conditions for the equation of vertical soil water transfer in the aeration zone of the soil layer.

SWAP and FAO 56 models have been used to evaluate the dynamics of soil water content of root-inhabited soil layer, the crop transpiration and the soil surface evaporation, as well as the water stress of agricultural cenosises and their water needs under different meteorological conditions for the 2012 vegetation season. The combination of satellite- and ground-based investigation results has made it possible to develop methodology for assessing the water efficiency of agricultural crop irrigation as well as technology for operational irrigation management.

The case study has been carried out for several territories located in the forest-steppe and steppe zones of Russia: the Seim River basin (Kursk region) with area of 7460 km² (for 1997–2008 vegetation seasons); part of the Central Black Earth zone of the European Russia, including its 7 regions with total area of 227 300 km² (for 2009–2016 vegetation seasons) and the Marx district of the Saratov region with area of about 700 km² (for 2012 vegetation season).

Keywords: modeling, thematic processing satellite data, soil water content, evapotranspiration, transpiration, land surface temperature, precipitation, leaf area index, vegetation cover fraction, irrigation water efficiency, space-temporal analysis

Accepted: 08.12.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136

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.
- 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., Opredelenie parametrov oblachnogo pokrova i osadkov po dannym MSU-MR s polyarnoorbital'nogo meteosputnika Meteor-M №2 dlya Evropeiskoi territorii Rossii (Estimation of cloudiness parameters and precipitation amount from data of MSU-MR established on board of polar-orbital meteorological satellite Meteor-M № 2 for the European territory of Russia), *14 Konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (14th Conference "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2016, pp. 157.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zeiliger A. M., Tochnoe (differentsirovannoe) oroshaemoe zemledelie tekhnologiya povysheniya effektivnosti orosheniya i snizheniya nagruzki na okruzhayushchuyu sredu, *Sbornik nauchnykh dokladov VIM*, 2010, Vol. 2, pp. 633–638.
- Zeiliger A. M., Upravlenie oroshaemym zemledeliem po dannym nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa, In: Upravlenie sel'khozpredpriyatiem s ispol'zovaniem kosmicheskikh sredstv navigatsii (GLONASS) i distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Management of an agrarian enterprise using GLONASS and remote sensing techniques), M.: FGBOU RGAU-MSKhA imeni K. A. Timiryazeva, 2016.
- Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Otsenka trendov degradatsii/progradatsii rastitel'nogo pokrova sel'skokhozyaistvennykh zemel' s ispol'zovaniem dannykh DZZ, *12 Konf. "Sovremennye problemy distantsi*onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (12th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2014, p. 362.
- Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya polivnoi vody posevami sel'skokhozyaistvennykh kul'tur s ispol'zovaniem modeli SEBAL, *12 Konf. "Sovremennye problemy distantsi*onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (12th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2014. p. 363.
- Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Rezul'taty analiza naborov dannykh MOD16 ET za 2000-2009 gody dlya territorii Pallasovskogo raiona Volgogradskoi oblasti RF, *13 Konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (13th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2015, p. 400.
- Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., 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, *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: Sbornik statei v 2 t., T. 2, Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economy. Informatics: Collected works, Vol. 2: Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2016, pp. 258–273.
- 13. Zeiliger A.M., Ermolaeva O.S., Informatsionnye tekhnologii v monitoringe bogarnykh i oroshaemykh agrotsenozov, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, No. 10 (chast' 1), pp. 62–66.
- 14. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Analiz rezhima vodnogo stressa oroshaemykh agrotsenozov s ispol'zovaniem dannykh kosmicheskogo monitoringa agrogidrologicheskikh modelei AquaCrop i SWAP, 14 Konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (14th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2016, p. 352.
- Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Komp'yuternyi kod otsenki evapotranspiratsii agrotsenozov po dannym DZZ, *14 Konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (14th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, 2016, p. 353.
- 16. 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, *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: Sbornik statei v 3 t.*, *T. 3, Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economy. Informatics: Collected works, Vol. 3: Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2015, pp. 35–48.

E. L. Muzylev, Z. P. Startseva, A. B. Uspensky, E. V. Volkova, E. V. Vasilenko, A. V. Kukharsky, A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva

- 17. Zeiliger A. M., Tuluzakov M. L., Elektromagnitnyi induktometr dlya vertikal'nogo profilirovaniya vlagozapasov pochvenno-gruntovoi tolshchi, *Prirodoobustroistvo*, 2013, No. 4, pp. 36–40.
- Zeiliger A. M., Fartukov V.A., Kositsyn A. V., Rezul'taty polevykh eksperimentov po testirovaniyu tekhnologii differentsirovannogo dozhdevaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur, *Sbornik nauchnykh dokladov VIM*, 2012, Vol. 2, pp. 430–434.
- 19. Kuchment L.S., Motovilov Yu.G., Startseva Z.P., Modelirovanie vlagoperenosa v sisteme pochvarastitel'nost'-prizemnyi sloi atmosfery dlya gidrologicheskikh zadach (Modeling water transfer in the "soilvegetation-surface layer of atmosphere" system for hydrological goals), *Vodnye resursy*, 1989, No. 2, pp. 32–39.
- 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.
- 21. Muzylev E. L., Uspenskii A. B., Startseva Z. P., Volkova E. V., Modelirovanie gidrologicheskogo tsicla 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.
- 22. 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.
- 23. 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.
- 24. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspenskii A. B., Vasilenko E. V., Volkova E. V., Kukharskii A. V., Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh o kharakteristikakh rastitel'nogo pokrova, meteorologicheskikh kharakteristikakh i vlazhnosti poverkhnosti pochvy v modeli formirovaniya vodnogo i teplovogo rezhimov obshirnoi territorii sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya (Utilization of remote sensing data on characteristics of vegetation cover, meteorological characteristics and soil surface humidity in the model of water and heat regimes formation for territory of large agricultural region), 14th Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa", (14th Conference "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Book of abstracts, Moskva, IKI RAN, 14–18 noyabrya 2016, p. 363.
- 25. Solov'ev V.I., Uspenskii S.A., Monitoring temperatury poverkhnosti 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.
- 26. Solov'ev V.I., Uspenskii A.B., Uspenskii S.A., 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.
- 27. Solov'ev V.I., Uspenskii S.A., Uspenskii A.B., 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 zond-irovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010b, Vol.7, No. 2, pp. 67-74.
- 28. Uspenskii A. B., Ob otsenke temperatury poverkhnosti sushi po dannym sputnikovykh izmerenii ukhodyashchego IK izlucheniya v diapazone 10.5–12.5 mkm (On the assessment of land surface temperature from satellite measurements of outgoing IR radiation in the range 10.5-12.5 μm), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1992, No. 10, pp. 19–27.
- 29. 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.
- 30. 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": Sb. tezisov, SPb, Iyun' 2011, SPb.: Izd-vo SPbGU*, 2011, pp. 37–38.

- Anderson R.G., Lo M.-H., Swenson S., Famiglietti J.S., Tang Q., Skaggs T.H., Lin Y.-H., Wu R.-J., Using satellite-based estimates of evapotranspiration and groundwater changes to determine anthropogenic water fluxes in land surface models, *Geoscientific Model Development*, 2015, Vol. 8, pp. 3021–3031.
- Andreassian V., Bergström S., Chahinian N., Duan Q., Gusev Y. M., Litllewood I., Machevet T., Michel C., Montanary A., Moretti G., Moussa R., Nasonova O. N., O'Connor K., Paquet E., Perrin C., Rousseau A., Schaake J., Wagener T., Xie Z., Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005, *Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment MOPEX*, IAHS Publ., No. 307, 2006, pp. 41–93.
- 33. Bahir M., Boulet G., Olioso A., Rivalland V., Gallego-Elvira B., Mira M., Rodriguez J.-C., Jarlan L., Merlin O., Evaluation and Aggregation Properties of Thermal Infra-Red-Based Evapotranspiration Algorithms from 100 m to the km Scale over a Semi-Arid Irrigated Agricultural Area, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, p. 1178.
- 34. Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A., Holtslag A.A.M., The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1, Formulation, *J. Hydrology*, 1998, Vol. 212-213, pp. 198–212.
- Bastiaanssen W. G. M., Noordman E. J. M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B. P., Allen R. G., SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, Vol. 131, No. 1, pp. 85–93.
- 36. Becker F., Li Z.-L., Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems, *Remote Sensing Rev.*, 1995, Vol. 12, pp. 225–253.
- 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, *Advanced Remote Sensing*, 2015, Vol. 4, No. 3, pp. 234–247.
- 38. 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.
- 39. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHS), Report No. 27, Institut fűr Meteorologie, Freie Universitat Berlin, Germany, 1993, 103 p.
- 40. Ceron C. N., Melesse A. M., Price R., Dessu S. B., Kandel H. P., Operational actual wetland evapotranspiration estimation for South Florida using MODIS imagery, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 3613–3632.
- 41. 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.
- 42. Diarra A., Jarlan L., Er-Raki S., Le Page M., Aouade G., Tavernier A., Boulet G., Ezzahar J., Merlin O., Khabba S., Performance of the two-source energy budget (TSEB) model for the monitoring of evapotranspiration over irrigated annual crops in North Africa, *Agricultural Water Management*, 2017, Vol. 193, pp. 71–88.
- 43. Elhaddad A., Garcia A, Chavez J. L., Using a surface energy balance model to calculate spatially distributed actual evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, Vol. 137, No. 1, pp. 17–26.
- 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. Applied Meteorology, 2000, Vol. 39, pp. 971–982.
- 45. 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.
- 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*, InTech – Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, 2012, Chapter 6, pp. 141–176.
- 47. Good E., Blending in situ and satellite data for monitoring land air temperatures, *Proc. Meteorological Satellite Conference*, Bath, UK, 21–25 September 2009, 2009. 5 p.
- Goodrich D. C., Scott R., Qic J., Goff B, Unkrich C. L., Morana M. S., Williams D., Schaeffer S., Snyder K., MacNish R., Maddock T., Pool D., Chehbouni A., Cooper D. I., Eichinger W. E., Shuttleworth W. J., Kerri Y., Marsett R., Ni W., Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in situ measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, Vol. 105, pp. 281–309.
- 49. 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.
- Karimi P., Bastiaanssen W.G.M., Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting — Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, Vol. 19, pp. 507–532.
- Khanbilvardi R., Lakhankar T., Krakauer N., Nazari R., Powell A., *Remote sensing data and information for hydrological monitoring and modeling*, Handbook of Engineering Hydrology: Modeling, Climate Change, and Variability, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2014, Chapter 24, pp. 503–517.
- 52. 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.*, 1990, Vol. 36, No. 6, pp. 631–643.

- 53. 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 Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, Vol. 131, pp. 40–51.
- 54. Liou Y.-A., Kar S.K., Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms A Review, *Energies*, 2014, Vol. 7, pp. 2821–2849.
- 55. Moehrlen C., *Literature review of current used SVAT models*, Internal Report 04-99, Department of Civil & Environmental Engineering, University College Cork, Ireland, 1999, 22 p.
- Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B., Volkova E. V., Utilization of AVHRR/NOAA based land surface temperatures in modeling the hydrological cycle of river basins, *Proc. Intern. Rad. Symp. (IRS-2000)*, 24–29.07.2000, St. Petersburg, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 2001, pp. 40–44.
- Muzylev E., Startseva Z., Uspensky A., Volkova E., Vasilenko E., Kukharsky A., Using satellite data on meteorological and vegetation characteristics and soil surface humidity in the Land Surface Model for the vast territory of agricultural destination, *Geophysical Research Abstracts*, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 24–28 April 2017, Vol. 19, p. 12725.
- 58. Overgaard J., Rosbjerg D., Butts M.B., Land-surface modeling in hydrological perspective a review, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, pp. 229–241.
- 59. Pitman A. J., The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models, *Int. J. Climatology*, 2003, Vol. 3, pp. 479–510.
- 60. *Product User Manual*, Land Surface Temperature (PUM LST), LSA SAF, SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.1, 2008, 49 p.
- 61. Rwasoka D.T, Gumindoga W., Gwenzi J., Estimation of actual evapotranspiration using the surface energy balance system (SEBS) algorithm in the Upper Manyame catchment in Zimbabwe, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, Vol. 36, No. 14-15, pp. 736–746.
- 62. Serban C., Maftei C., Barbulescu A., Assessment of evapotranspiration using remote sensing data and grid computing and application, *WSEAS Transactions on Computers*, 2010, Vol. 9, No. 11, pp. 1245–1254.
- 63. 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.
- 64. Su H., McCabe M., Wood E., Su Z., Prueger J., Modeling evapotranspiration during SMACEX: Comparing two approaches for local-and regional-scale prediction, *Journal of Hydrometeorology*, 2005, Vol. 6, No. 6, pp. 910–922.
- 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, pp. 284–307.
- 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.
- 67. Valor E., Caselles V., Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African, and South American areas, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 57, pp. 167–184.
- 68. Van de Griend A.A., Owe M., On the relationship between thermal emissivity and normalized vegetation index for natural surfaces, *Intern. J. Remote Sensing*, 1993, Vol. 14, No. 6, pp. 1119–1131.
- 69. Wan Z., Dozier J., A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 1996, Vol. 34, No. 4, pp. 892–905.
- Xia T., Kustas W. P., Anderson M. C., Alfieri J. G., Gao F., McKee L., Prueger J. H., Geli H. M.E., Neale C. M.U., Sanchez L., Alsina M. M., Wang Z., Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one- and two-source modeling schemes, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, Vol. 20, pp. 1523–1545.
- Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., SEBAL Model Using to Estimate Irrigation Water Efficiency & Water Requirement of Alfalfa Crop, *Geophysical Research Abstracts*, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, April 2013, Vol. 15, p. 12671.
- 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, April 2016, Vol. 18, p. 13486.
- 73. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Management Strategies to Sustain Irrigated Agriculture with Combination of Remote Sensing, Weather Monitoring & Forecasting and SWAP Modeling, *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly*, Vienna, Austria, April 2017, Vol. 19, p. 15422.