

5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока. Метеорология и гидрология, №2, 2007, С. 83–95.

6. Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect. Geograph Compass 3(5), 2009, Pp. 1841-1864.

7. Motovilov, Yu. G., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A.: ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series. no.105, 1999. 88 p.,

8. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. – М.: Наука, 1983. -230 с.

9. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования //Лед и Снег, 2015 (в печати).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМОВ КРУПНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СЪЕМКИ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ**

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

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии  
“Планета” Росгидромета, г. Москва  
muzylev@aqua.laser.ru

Перспективный путь получения корректных оценок компонент водного и теплового балансов значительных по размерам территорий заключается в настоящее время в создании физико-математических моделей вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой (LS-моделей, Land Surface Model) и разработке методов расчета этих компонент для указанных территорий с помощью таких моделей. Разработка версии LS-модели для теплого периода года, адаптированной к спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности (ПП) и метеоусловиях, и расчет с ее помощью компонент водного и теплового балансов территории регионального масштаба для сезона вегетации составляли

цель настоящей работы. Основной задачей при создании данной версии модели являлась разработка процедур использования в модели в качестве параметров или входных переменных оценок характеристик растительного покрова и метеорологических характеристик для исследуемой территории, полученных путем тематической обработки спутниковых данных, при учете пространственной неоднородности полей этих оценок. Исследования проводились на примере находящейся в лесостепной зоне территории части сельскохозяйственного Центрально-Черноземного региона (ЦЧР) России площадью 227300 км<sup>2</sup> с координатами 49° 30' -54° с.ш. и 31° -43° в.д., включающей Курскую, Белгородскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области.

Разрабатывавшаяся LS-модель предназначена для расчета влагозапасов почвы  $W$  (в том числе запасов продуктивной почвенной влаги), суммарного испарения  $E_v$  (испарения с голой почвы и транспирации растительности), вертикальных потоков скрытого  $LE$  и явного тепла, а также распределений влажности и температуры почвы по глубине, температуры поверхностей почвы и растительного покрова  $T_b$ , радиационной температуры подстилающей поверхности (ПП)  $T_s$ . Подстилающая поверхность (ПП) рассматривалась в модели как совокупность двух слоев – почвы и растительности. Основу модели составляют уравнение диффузии влаги в почву, учитывающее поглощение воды корнями растений, полуэмпирические формулы для определения испарения с поверхности голой почвы и транспирации растительности, уравнение теплопроводности для почвы и уравнения теплового баланса для ее поверхности и растительного покрова. Верхние граничные условия для этих уравнений задавались в виде потоков влаги и тепла на поверхностях растительного покрова и почвы, а нижние – в виде градиентов влажности и температуры почвы на нижней границе ее деятельного слоя. Входными переменными модели являются суммарная радиация, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, осадки, облачность, скорость ветра, температура поверхности почвы, значения которых определялись по данным стандартных срочных наблюдений на 48 агрометеорологических станциях региона с последующей интерполяцией для разных участков его территории. Разнообразие свойств ПП описывается с помощью параметров, являющихся характеристиками почв и растительности. При реализации модели для исследуемой территории оценки ряда характери-

стик ПП и метеорологических характеристик были получены по данным измерений радиометров AVHRR (ИСЗ серии NOAA), MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua) и SEVIRI (геостационарные ИСЗ Meteosat-9, -10). По спутниковым данным строились оценки вегетационного индекса NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью  $V$ , излучательной способности ПП и ее радиационной температуры  $T_{ls}$ , температуры поверхности растительного покрова  $T_a$ , облачности и осадков. Значения всех входных переменных и параметров модели, определявшихся по наземным и спутниковым данным, а также результатов моделирования – компонент водного и теплового балансов и температур поверхностей растительного покрова и почвы – рассчитывались в узлах регулярной сетки с ячейкой, равной по размерам фрагменту спутникового изображения радиометра AVHRR (3x3 пиксела (~ 5x7 км<sup>2</sup>)).

При создании версии LS-модели, адаптированной к оценкам характеристик ПП и метеорологических характеристик по спутниковым данным, разработаны следующие процедуры использования всех этих оценок (при учете их распределений по площади) [1-4].

1. Замена оценок листового индекса LAI и проективного покрытия  $V$  (являющихся параметрами модели) по данным наземных наблюдений на их спутниковые оценки. Допустимость такой замены проверена путем сравнения временных ходов LAI, определенных по данным нескольких спутников и по наземным данным (рис.1); результатов расчета влагосодержания почвы  $W$  и суммарного испарения  $E_v$  по модели с результатами наземных измерений (рис.2а, в), результатов смоделированных значений ТПП  $T_s$  и воздуха на границе растительного покрова  $T_f$  с их спутниковыми аналогами  $T_{ls}$  и  $T_a$  и данными наземных наблюдений.

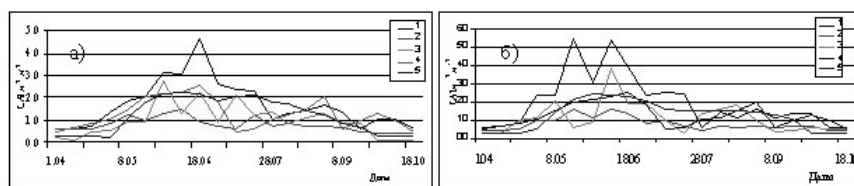


Рис. 1 – Временные ходы LAI за сезон вегетации 2012 г. на агрометеорологических станциях Обоянь (а) и Рыльск (б) по данным AVHRR для зерновых (1) и трав (2), MODIS (3), SEVIRI (5) и по наземным данным (4)

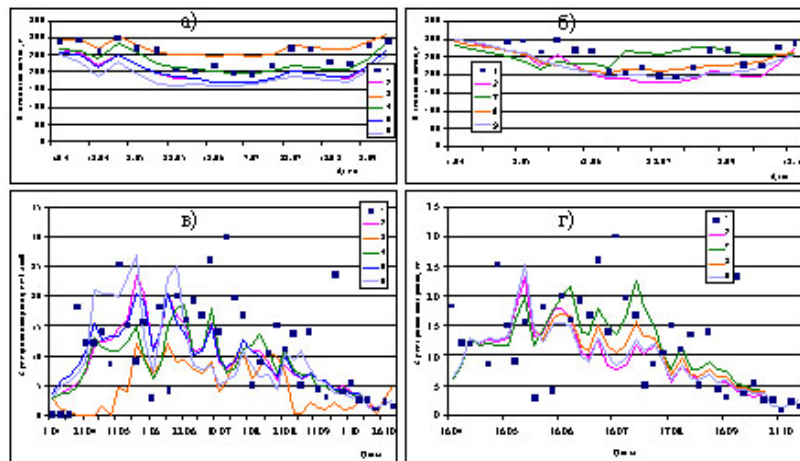


Рис. 2 – Влагозапасы почвы W (а), (б) и суммарное испарение Ev (в) и (г) за пентаду для сезона вегетации 2012 г., измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1) и рассчитанные по модели для агрометеорологической станции Рыльск: при оценках осадков по наземным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

2. Ввод в модель в качестве входных переменных значений ТПП  $T_{is}$  и  $T_w$ , определенных по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI (рис.3), вместо их оценок по наземным данным с проверкой адекватности результатов моделирования при такой замене путем сравнения рассчитанных и измеренных значений влагосодержания почвы и суммарного испарения.

Прямое введение в модель данных SEVIRI с большой частотой съемки позволило произвести расчеты влагосодержания почвы, суммарного испарения и других компонент водного и теплового балансов с погрешностью, меньшей стандартной, особенно в первый месяц вегетационного периода. При этом значения ТПП определяются по этим данным с большей точностью, чем по данным AVHRR/ NOAA или MODIS/Terra и Aqua. Однако при использовании данных SEVIRI, получаемых раз в 15 минут и осредняемых по трехчасовым интервалам, возникают определенные затруднения, обусловленные сложностью отыскания для обширной территории безоблачных периодов большой продолжительности, что обеспечи-

вало бы возможность формирования длинного многодневного ряда непрерывных внутрисуточных измерений.

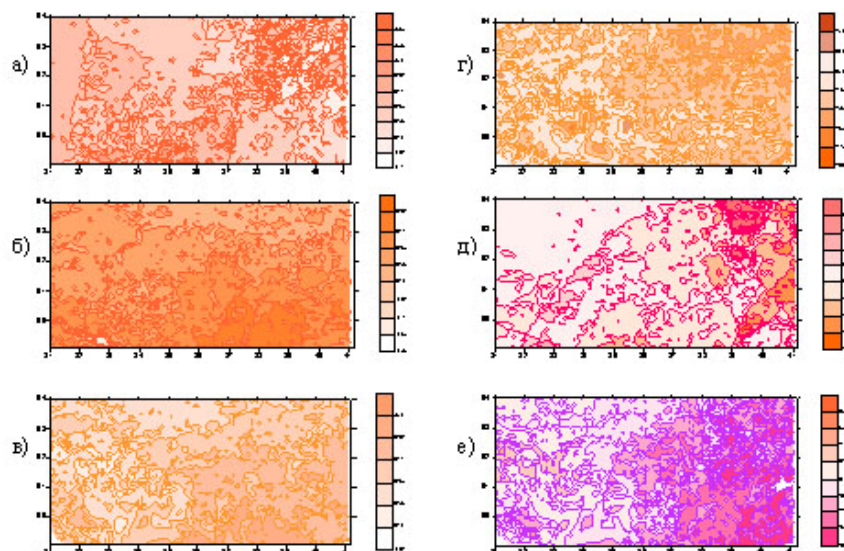


Рис. 3 – Температура поверхности растительного покрова, рассчитанная по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений  $T_f$  (а), определенная по данным AVHRR  $T_a$ (AVHRR)(б) и SEVIRI  $T_a$ (SEVIRI) (в), и разности  $T_a$ (AVHRR) -  $T_a$ (SEVIRI) (г),  $T_f$ -  $T_a$ (AVHRR) (д),  $T_f$ -  $T_a$ (SEVIRI) (е) для территории части ЦЧР площадью 227300 км<sup>2</sup> на 15 ч местного времени 30.07.2012

3. Ввод в модель величин осадков за вегетационный период, определенных для района исследований по данным измерений AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat-9, -10. (Методика оценки осадков по этим данным разработана в НИЦ “Планета” Росгидромета [5]). Ключевым моментом предложенного способа является переход от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных величин. Реализация такого перехода требует проверки корректности полученных оценок на каждом временном шаге, включающей сравнение площадных распределений полей осадков, построенных по данным AVHRR и SEVIRI и при интерполяции данных сетевых наземных наблюдений (рис.4).

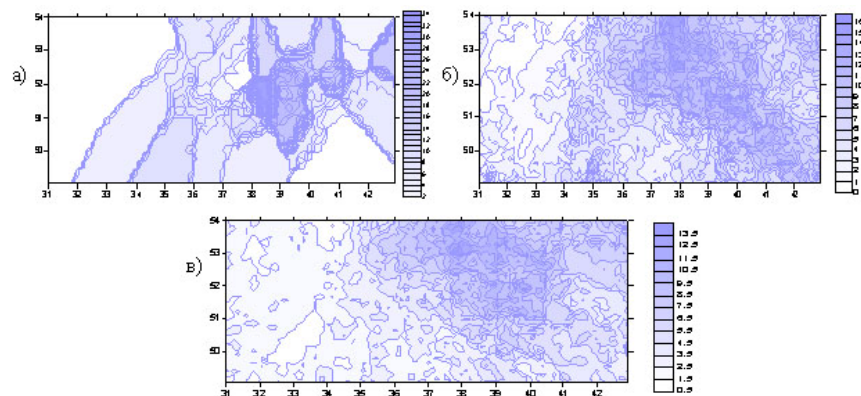


Рис. 4 – Распределения по площади исследуемого региона суточных сумм осадков за 09.10.2012 г., построенные по: данным наземных наблюдений (а), AVHRR/NOAA (б) и SEVIRI/Meteosat-10 (в)

Вероятность определения зон осадков по спутниковым данным при сопоставлении с данными наземных наблюдений на метеостанциях составила 75-85 %. Спутниковые оценки суточных и месячных сумм осадков, согласуясь между собой, оказываются несколько сглаженными по сравнению с соответствующими оценками, полученными по данным наземных наблюдений. Различия характерны в основном для локализованных осадков значительной интенсивности и не очень большой продолжительности, спутниковые оценки которых по величине меньше наземных, что может быть обусловлено разными пространственными масштабами площадных спутниковых и точечных наземных оценок и особенностями примененной интерполяционной процедуры. Значения влагозапасов почвы и суммарного испарения, рассчитанные по модели с использованием спутниковых оценок осадков вместо их оценок по наземным данным, неплохо согласуются с результатами измерений на агрометеорологических станциях (рис.2 б, г).

Таким образом, реализована версия LS-модели для обширных территорий, используемая для спутниковых оценок характеристик растительного покрова и метеорологических. С помощью модели получены оценки компонент водного и теплового балансов за сезон вегетации 2010-2012 гг. для территории части ЦЧР площадью 227300 км<sup>2</sup> при использовании значений листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью В, температур подстилающей поверхности  $T_{is}$  и верхней границы растительности  $T_a$  и

осадков, определенных по данным радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и Aqua и SEVIRI/Meteosat-9, -10. Выходными продуктами являются: влагосодержание почвы  $W$ , суммарное испарение  $E_v$  (значения представлены в виде распределений по площади исследуемой территории, рис. 5 и 6), инфильтрация воды в почву, поток влаги из ее верхнего метрового слоя в нижележащие горизонты, потоки скрытого LE и явного тепла, температуры подстилающей поверхности  $T_s$  и растительного покрова  $T_r$ .

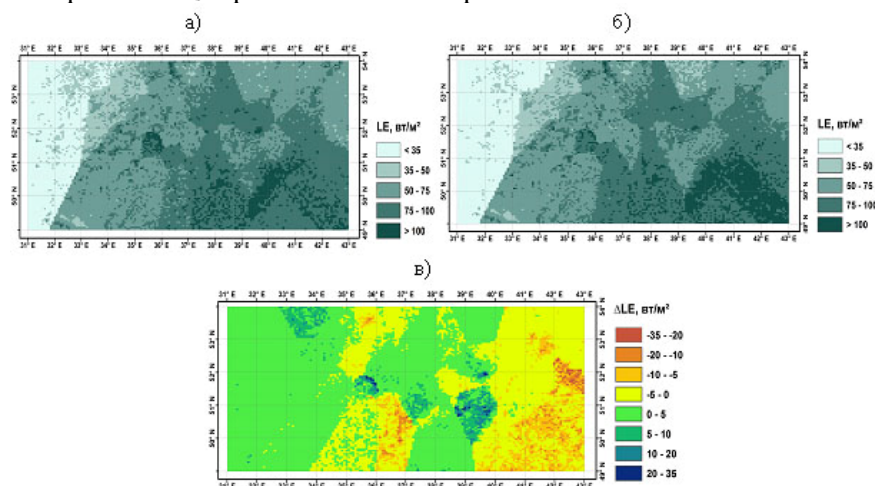


Рис. 5 – Потоки скрытого тепла за сутки LE ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), рассчитанные по модели с использованием оценок суточных сумм осадков, построенных по данным наземных измерений (а) и данным SEVIRI (б), и их разность (в) для исследуемой территории площадью  $227300 \text{ км}^2$  на 15 мая 2012 г.

Точность оценок  $E_v$  и  $W$  проверялась путем сравнения с результатами измерений на агрометеорологических станциях. Погрешность результатов расчета  $E_v$  для разных временных интервалов при всех вариантах задания параметров и входных переменных не превышала стандартной ошибки его оценки ( $\sim 20\text{-}25\%$ ), а ошибки оценки величин  $W$  для разных вариантов расчетов находились в пределах  $10\text{-}15\%$ . Подобная точность оценки  $E_v$  и  $W$  является вполне приемлемым результатом.

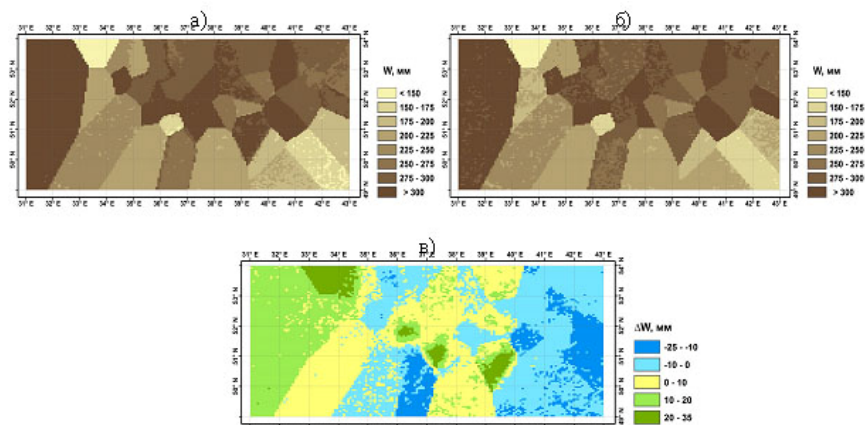


Рис.6 – Влагозапасы почвы  $W$  (мм), рассчитанные по модели с использованием оценок суточных сумм осадков, построенных по данным наземных измерений (а) и данным SEVIRI (б), и их разность (в) для исследуемой территории площадью  $227300 \text{ км}^2$  на 15 мая 2012 г.

Основной вывод настоящей работы заключается в возможности построения с приемлемой точностью пространственных распределений влагосодержания почвы, суммарного испарения и других компонент водного и теплового балансов для территории обширного сельскохозяйственного региона с помощью разработанной LS-модели, пригодной для использования спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик.

### Литература

1. 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.
2. Gelfan A., Muzylev E., Uspensky A., Startseva Z., Romanov P. Remote Sensing Based Modeling of Water and Heat Regimes in a Vast Agricultural Region // Remote Sensing – Applications. Ed. Boris Escalante-Ramirez. InTech – Open Access Publisher, Rijeka, Croatia. 2012. Chapter 6. P.141–176.
3. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Моделирование водного режима территории крупного сельскохозяйственного региона с использова-



нием данных измерений геостационарных метеорологических спутников //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 3. С.53-65.

4. Zoya Startseva, Eugene Muzylev, Elena Volkova, Alexander Uspensky, Sergey Uspensky. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data// International Journal of Remote Sensing. 2014. V.35. N 15. P. 5775-5799.

5. 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.

### **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ОЦЕНКАХ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА СЕВЕРНЫХ РЕК РОССИИ<sup>10</sup>**

Насонова О.Н.<sup>1</sup>, Гусев Е.М.<sup>1</sup>, Володин Е.М.<sup>2</sup>, Ковалев Е.Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН, г. Москва  
nasonova@aqua.laser.ru

На современном этапе для оценки влияния возможного изменения климата на речной сток наибольшее распространение получил подход, основанный на использовании гидрологических моделей и результатов расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (AOGCMs: Atmosphere-Ocean Global Climate Models). Последние являются основным инструментом для получения физически обоснованных сценариев изменения климата, в свою очередь основанных на сценариях эмиссии парниковых газов в атмосферу. С помощью AOGCMs рассчитывается соответствующая заданным сценариям динамика метеорологических элементов в XXI веке, значения которых используются затем в гидрологических моделях для получения прогностических сценариев изменения гидрологических характеристик. Если пространственное разрешение расчетной сетки климатических моделей оказывается более грубым по сравнению с

---

<sup>10</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00027).