



**Оценка характеристик водного и
теплового режимов части Центрально-
Черноземного региона России с
использованием данных измерений
полярно-орбитальных и геостационарных
метеорологических спутников**

Музылев Е.Л.* , Успенский А.Б. , Старцева З.П.* ,
Волкова Е.В.** , Кухарский А.В.****

*** Институт водных проблем РАН, г. Москва**

**** Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии “Планета” Росгидромета, г.Москва**

Цель исследований

Разработка методов оценки характеристик водного и теплового режимов обширных территорий с помощью физико-математической модели влаго- и теплообмена покрытых растительностью территорий с атмосферой (LS-модели, Land Surface Model), рассчитанной на использование спутниковых данных о состоянии подстилающей поверхности и метеоусловиях

LS-модель предназначена для расчета запасов влаги в почве, суммарного испарения (испарения с голой почвы и транспирации растительности), вертикальных потоков скрытого и явного тепла, вертикальных профилей влажности и температуры почвы, температуры поверхностей почвы и растительного покрова, а также радиационной температуры подстилающей поверхности при учете пространственной изменчивости всех названных величин

Задачи исследований

Разработка технологий оценки характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по данным измерений радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua) и SEVIRI (геостационарные ИСЗ Meteosat-9, -10) путем создания и усовершенствования методов их тематической обработки

Разработка процедур использования в LS-модели в качестве параметров или входных переменных спутниковых оценок характеристик растительного покрова, температур подстилающей поверхности и осадков с учетом пространственной неоднородности полей этих оценок

Расчет с помощью адаптированной к спутниковым данным модели запасов влаги в почве, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов для участка территории Центрально-Черноземного региона Европейской части России за сезоны вегетации 2009-2012 гг.

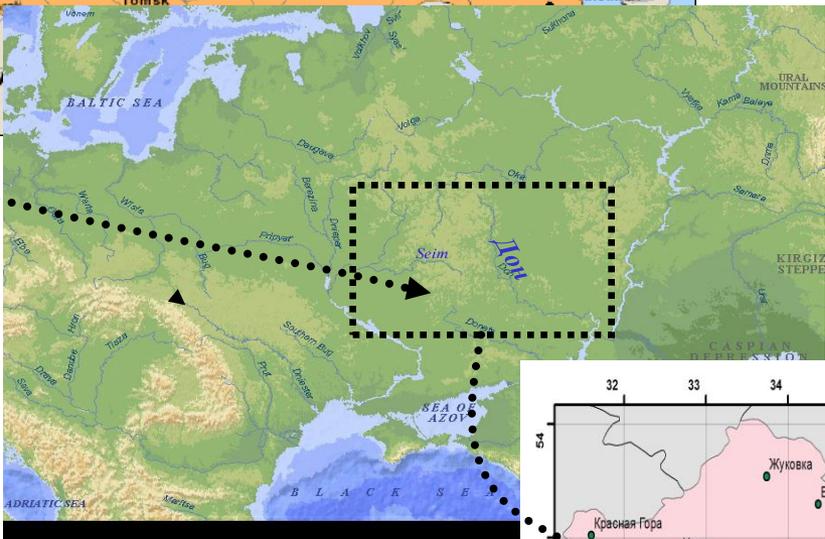
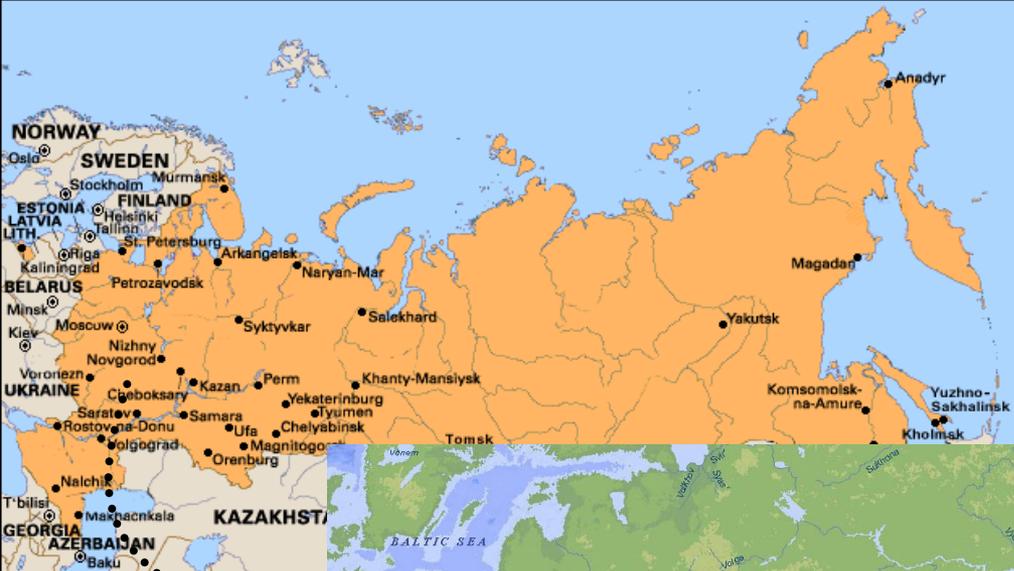


Схема района исследований - участка территории Центрально-Черноземного региона Европейской части России площадью 227300 км² с координатами 49°30'–54° с.ш. и 31°–43° в.д., включающей Курскую, Воронежскую, Белгородскую, Орловскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области.



Краткое описание LS-модели

Испарение с голой почвы

$$E_g = \rho_a \cdot r \cdot (q^*(T_g) - q_{af}) / r_{ag}$$

Транспирация растительности

$$E_f = \rho_a \cdot (q^*(T_f) - q_{af}) \cdot LAI / (r_a + r_s)$$

Влагоперенос в почве

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] - S_r(\theta, z)$$

Поглощение воды корнями растений

$$S_r(\theta, z) = -K(\theta) [\psi_r - \psi(\theta)] b \rho_r(z)$$

Водный потенциал листьев

$$\psi_f = \psi_r - r_r E_f$$

Коэффициент гидравлической проводимости

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2n+3}$$

Устьичное сопротивление

$$r_s = r_0 \frac{\psi(WP) - \zeta \psi_f}{\psi(WP) - \psi_f}$$

$$E_f = \rho_w \int_0^{\max z} S_r(\theta, z) dz$$

Поток явного тепла с голой почвы и с растительного покрова

$$H_g = \frac{\rho_a c_p (T_g - T_{af})}{r_{ag}}$$

$$H_f = \frac{\rho_a c_p (T_f - T_{af})}{r_{af}}$$

Уравнение

теплопроводности

$$C_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Радиационная температура поверхности T_s

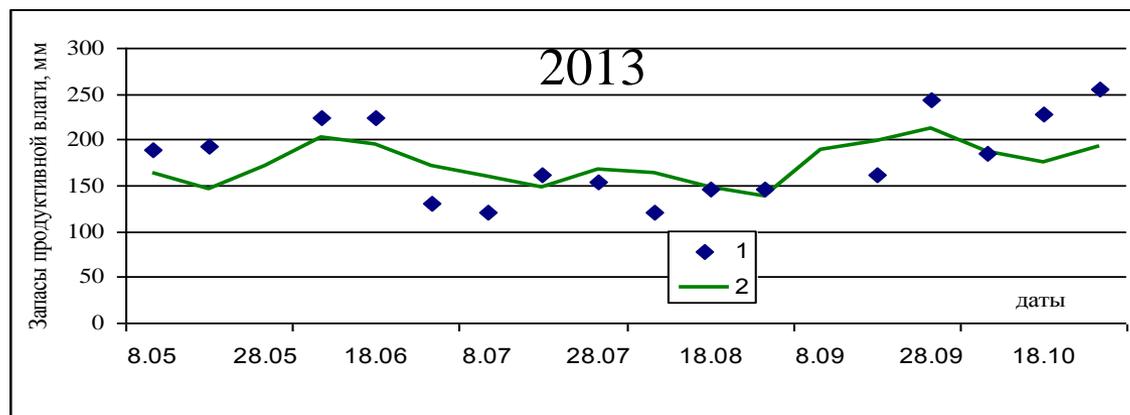
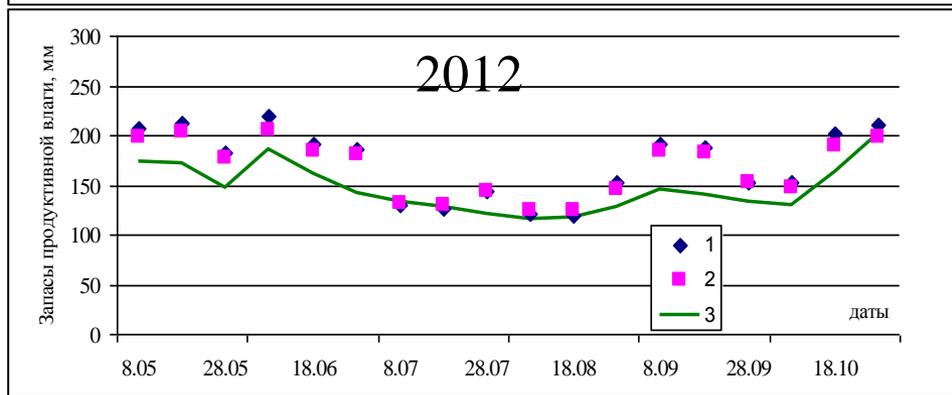
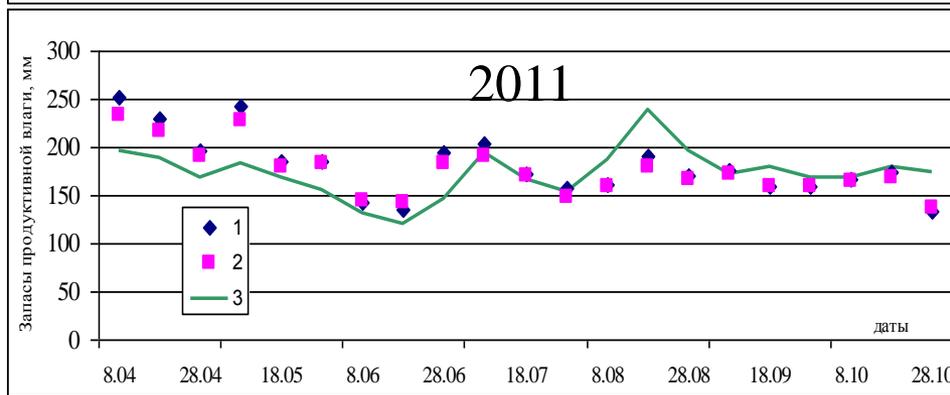
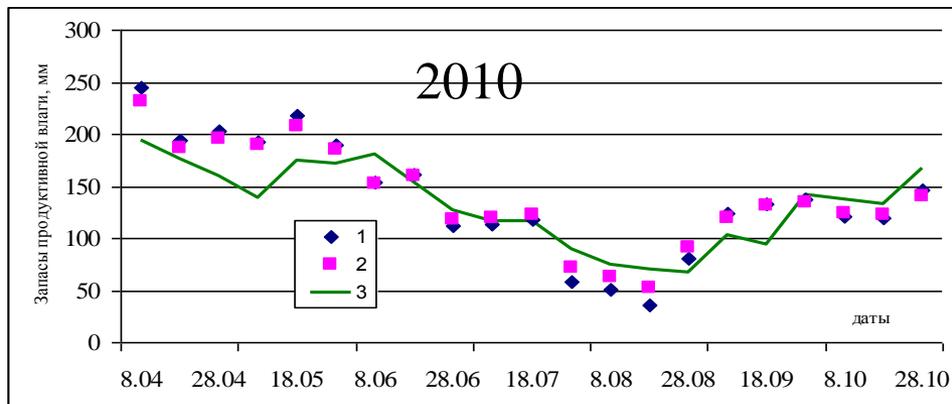
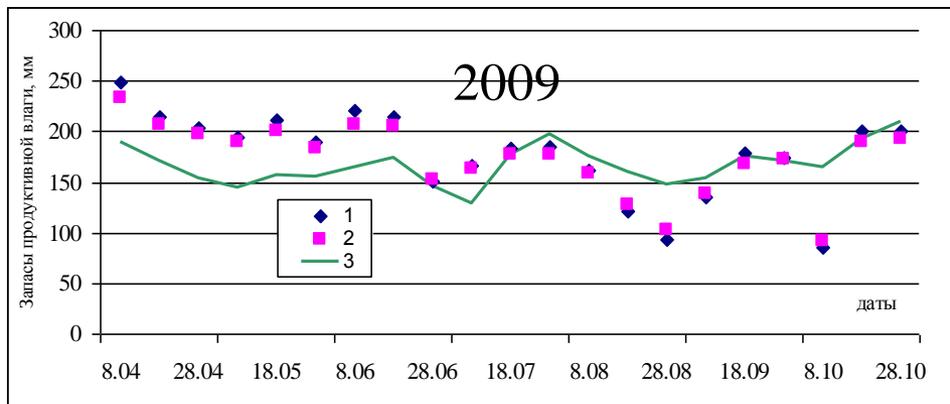
$$\sigma T_s^4 = R_a - R_{lf} - R_{lg}$$

Параметрами модели являются характеристики почв и растительного покрова. Наиболее значимыми из характеристик растительности являются проективное покрытие V и листовой индекс LAI.

Распределения типов почв строились с использованием баз данных ФАО.

Входными переменными модели являются суммарная радиация, температура, влажность и давление воздуха, осадки, облачность, скорость ветра, значения которых получают с помощью стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

Калибровка модели производилась по результатам сравнения вычисленных и измеренных значений влагозапасов метрового слоя почвы и суммарного испарения (при наличии последних), а также рассчитанных и фактических вертикальных профилей влажности и температуры почвы и значений температуры ее поверхности



Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы на агрометеорологической станции Рыльск: измеренные (1), рассчитанные по измеренным значениям профилей влажности, объёмного веса и влажности завядания (2) и по модели (3)

Метод определения температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , температуры T_g и излучательной способности E почвы, эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, облачности, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B по данным AVHRR включает:

- подготовку архивов синхронных спутниковых и наземных наблюдений;
- разработку автоматизированных пороговых алгоритмов выделения безоблачных фрагментов на изображениях AVHRR;
- разработку алгоритма определения величины B ;
- разработку алгоритма для определения величины ϵ ;
- построение и испытание линейных регрессионных зависимостей типа расщеплённого окна прозрачности для определения T_a , T_g и $T_{s,eff}$;
- анализ статистики ошибок оценок T_a , T_g и $T_{s,eff}$ путём сравнения с данными наземных наблюдений.

Среднеквадратические отклонения (СКО) для T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$ составили в рассматриваемые сезоны, соответственно, 2.3-2.7, 3.7-4.9 и 2.4-3.5°C. Наибольшие расхождения между наземными и спутниковыми оценками (особенно для T_g) обычно отмечаются в жаркий период лета (конец июня - июль), что может быть вызвано существенным (до +50-60°C) локальным перегревом поверхности почвы, разницей до полутора часов между спутниковыми и наземными наблюдениями и генерализацией спутниковых данных.

$LAI = -2.5 * \ln(1.2 - 2 * NDVI)$ – для сельскохозяйственных культур

$LAI = NDVI * 1.71 + 0.48$ – для травяных культур

Файлы с оценками T_{ls} , NDVI, LAI и E по данным MODIS/Terra и Aqua были получены через вебсайт NASA LP DAAC. Для T_{ls} были загружены LST/E Daily L3 product (MOD11B1) с пространственным разрешением ~ 4.8 км и LST/E 5-Min L2 product (MOD11_L2) с разрешением ~ 1 км. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем эти оценки получают за временной период в 8 дней.. Достоверность оценок T_{ls} (MOD11B1 и MOD11_L2) проверялась путем их сопоставления с данными квазисинхронных пространственно совмещенных наземных агрометеорологических наблюдений, а также с аналогичными оценками по данным AVHRR и SEVIRI. Оценки T_{ls} (MOD11B1) для большинства сроков оказались более достоверны, чем оценки T_{ls} (MOD11_L2). СКО оценок T_{ls} (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышали 3.5°C , а разности оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR) лежали в диапазоне $2.0-3.5^{\circ}$.

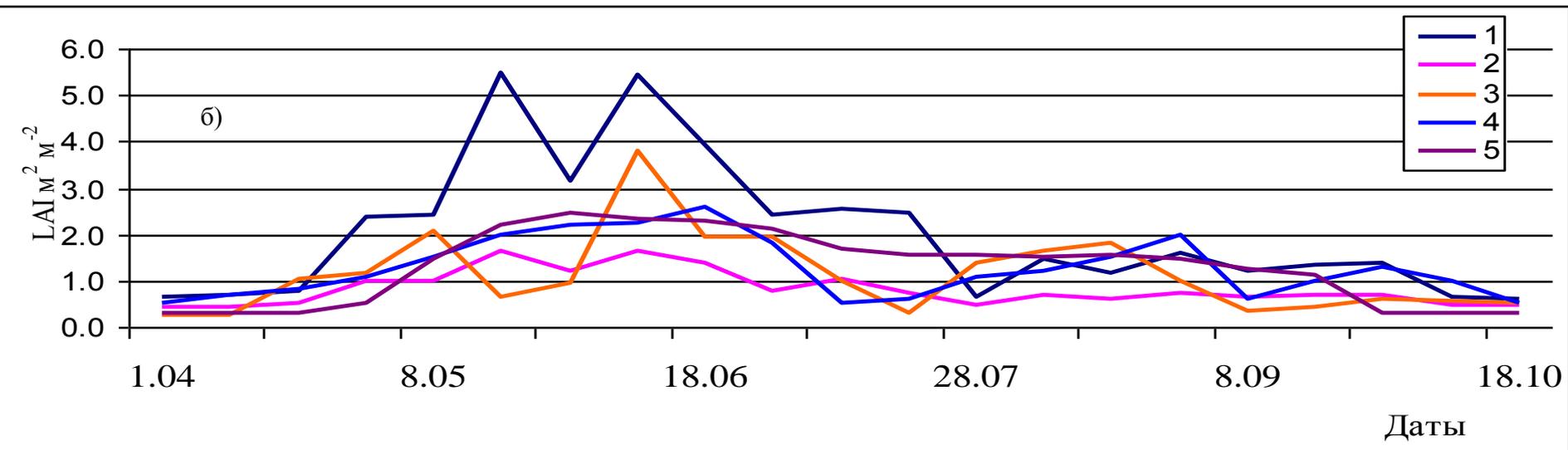
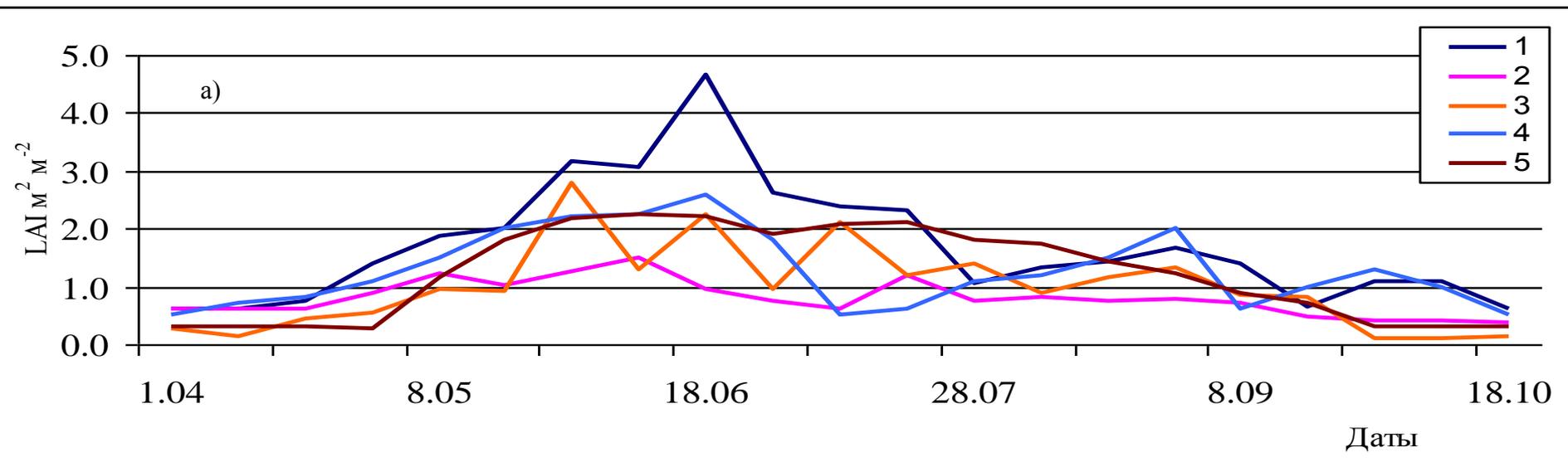
Метод получения оценок температуры подстилающей поверхности T_{1s} и E по 15-минутным данным измерений **радиометра SEVIRI, установленного на геостационарных метеоспутниках Meteosat-9, -10,** базируется на последовательном применении двух известных подходов – локального алгоритма “расщеплённого окна прозрачности” и метода “двух температур”. В нем используются данные SEVIRI для безоблачных условий в ИК каналах № 9 (10.8 мкм) и № 10 (12 мкм) за три последовательных срока, при этом задания хороших начальных приближений для величин E_9 и E_{10} не требуется. Анализ достоверности оценок T_{1s} (SEVIRI, “Планета”) проводился путём сопоставления с синхронными независимыми оценками T_{1s} (SEVIRI, LSA SAF) (LSA SAF – Прикладной спутниковый центр анализа данных о земной поверхности (Лиссабон, Португалия)). СКО оценок T_{1s} (SEVIRI, “Планета”) от T_{1s} (SEVIRI, LSA SAF) не превышало 2°C. Поскольку погрешность оценок T_{1s} (LSA SAF) лежит в диапазоне 1.5-2.5°C, корректность оценок T_{1s} (“Планета”) является удовлетворительной. Значения СКО T_{1s} (SEVIRI) от T_{1s} (MODIS) лежали в пределах 3.3-3.5°C. Расхождения между T_{1s} (SEVIRI) и T_{1s} (MODIS) можно, по-видимому, объяснить их разным пространственным разрешением и несинхронностью, а также использованием различных процедур совмещения пар данных оценок.

Значения температуры воздуха на границе растительного покрова T_a (SEVIRI) были получены путем построения регрессионной зависимости между оценкой T_{ls} (SEVIRI) и T_a . Связь между этими величинами зависит от времени суток, солнечного зенитного угла, типа подстилающей поверхности. Проверка такой регрессионной модели производилась с использованием данных срочных метеорологических наблюдений на агрометеостанциях исследуемого региона за 4 сезона вегетации. СКО оценок T_a для большинства сроков не превышало 2.5°C .

Значения B и LAI определялись в LSA SAF – Прикладном спутниковом центре анализа данных о земной поверхности (Лиссабон, Португалия) по данным в каналах 0.6, 0.8 и 1.6 мкм SEVIRI при отсутствии облачности. Оценки LAI и B включены в состав оперативно распространяемых выходных продуктов LSA SAF. Сначала оценивается B (с учетом эффектов анизотропии и геометрии наблюдений – угла визирования и солнечного зенитного угла), затем LAI (по формуле $B = 1 - \exp(k \cdot LAI)$, где k – параметр обратного рассеяния. Погрешности оценки B и LAI по данным SEVIRI/Meteosat-9 не превосходят 20 и 40 %, соответственно

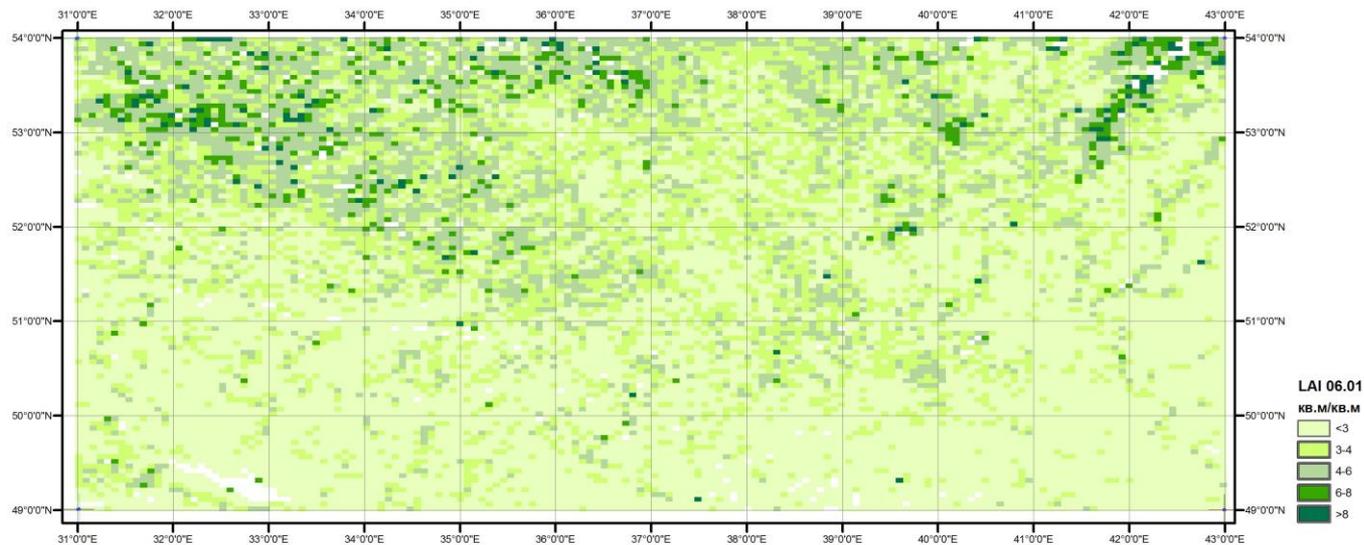
Адаптация модели к спутниковым оценкам характеристик подстилающей поверхности производилась путем перехода к вычислительной сетке размером 3x3 пиксела ИК каналов AVHRR (~7x5 км²). К этой сетке были приведены оценки температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , температуры T_{sg} и излучательной способности E почвы, эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B , облачности и осадков по данным AVHRR, оценки температуры подстилающей поверхности (ТПП) T_{ls} , E , NDVI, LAI по данным MODIS и оценки T_{ls} , T_a , E , LAI и осадков по данным SEVIRI. В узлах сетки определялись значения параметров и входных переменных модели и производились вычисления влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов, а также температуры поверхности растительного покрова T_f , почвы T_g и радиационной температуры поверхности T_s .

Разработка способов использования в LS-модели спутниковых данных включала: 1) замену являющихся параметрами модели величин LAI и В, определенных по данным наземных наблюдений, на их спутниковые оценки; 2) введение в модель в качестве переменных спутниковых оценок температуры подстилающей поверхности (ТПП) и осадков при согласовании моментов времени спутниковых (AVHRR и MODIS) и наземных наблюдений или при использовании данных SEVIRI с высокой частотой измерений при их относительной непрерывности; 3) разработку процедур учета в модели распределений по площади исследуемой территории спутниковых оценок LAI, В, ТПП и осадков и построенных с помощью интерполяционных методов по сетевым наземным данным оценок осадков, температуры и влажности воздуха путем ввода их значений в каждом узле вычислительной сетки.

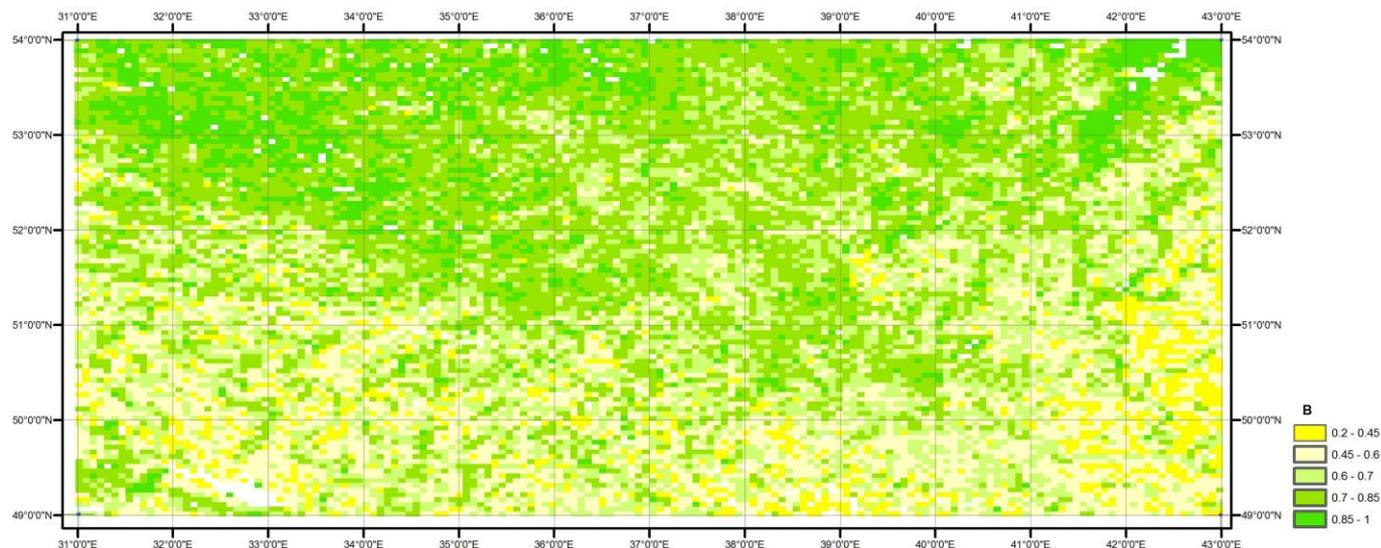


Временные ходы LAI за сезон вегетации 2012 г. на агрометеорологических станциях Обоянь (а) и Рыльск (б), построенные по данным AVHRR для зерновых (1) и трав (2), MODIS (3), SEVIRI (5) и по наземным данным (4).

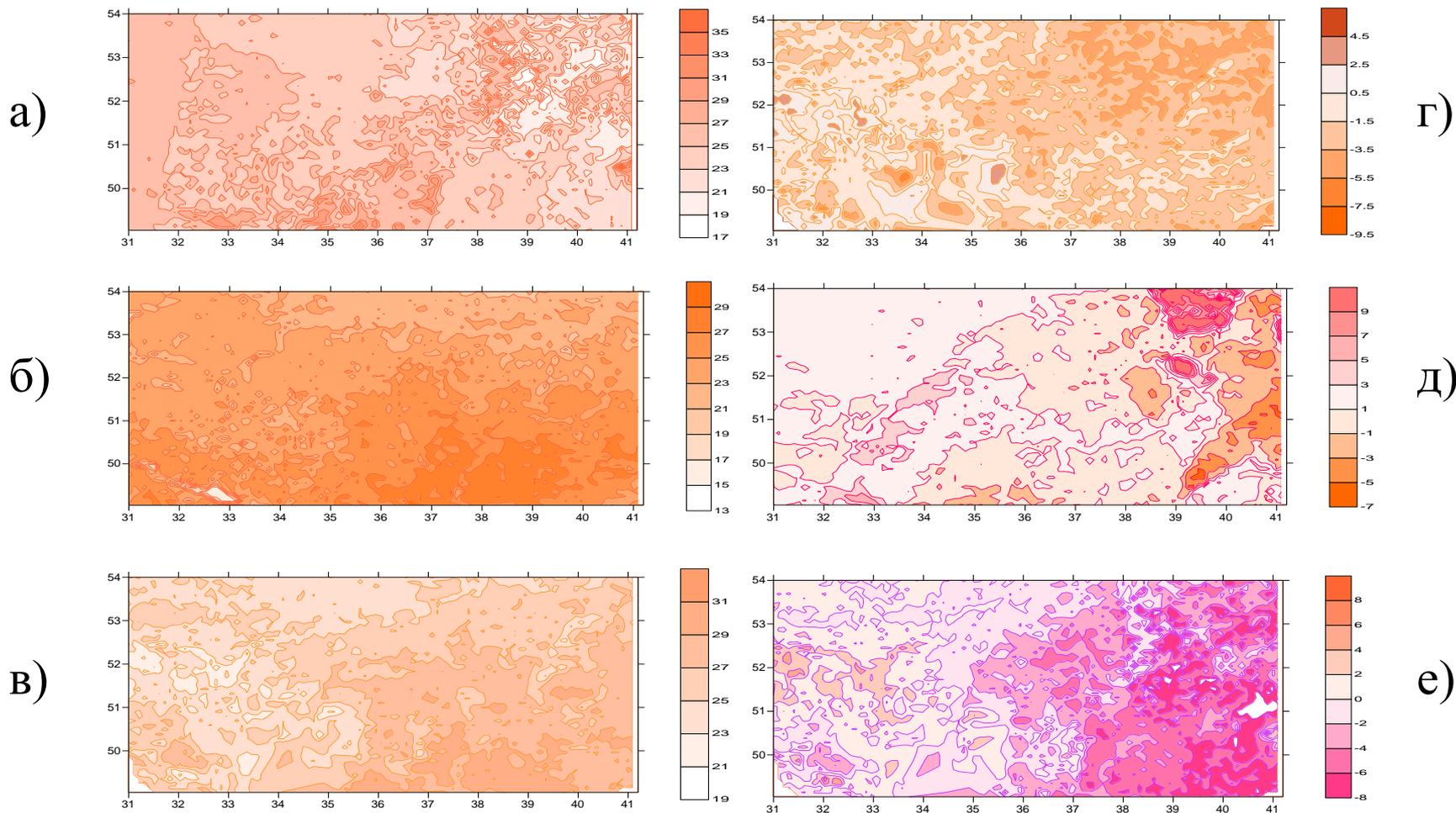
а)



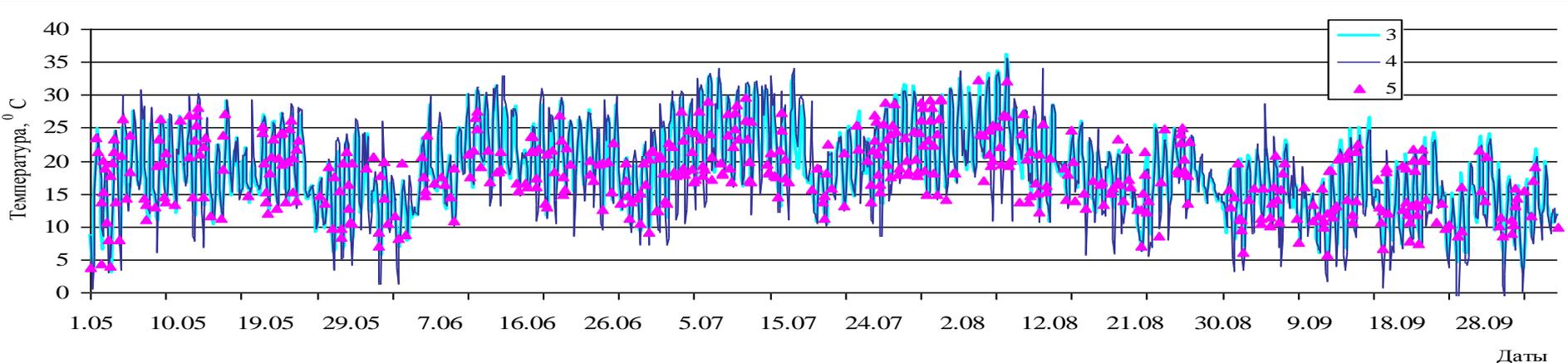
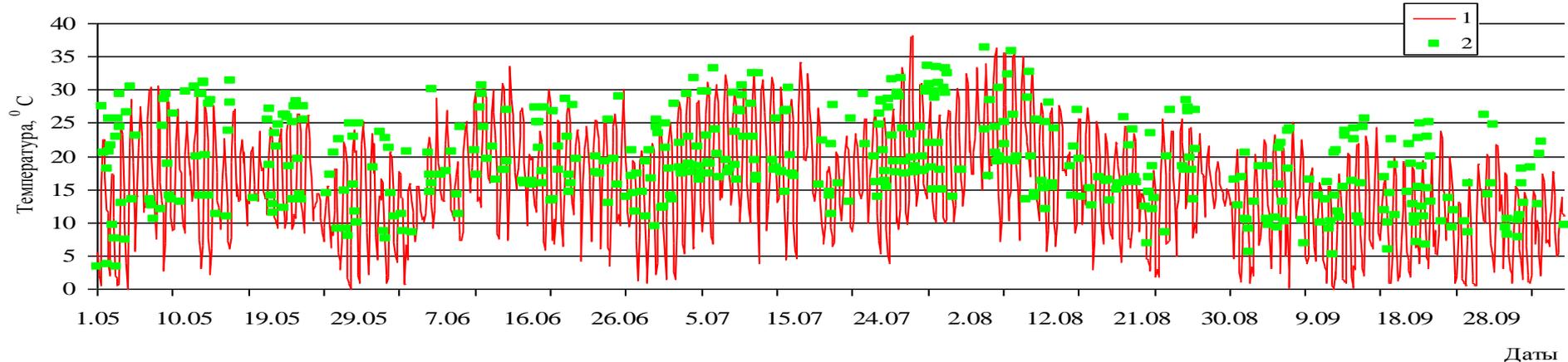
б)



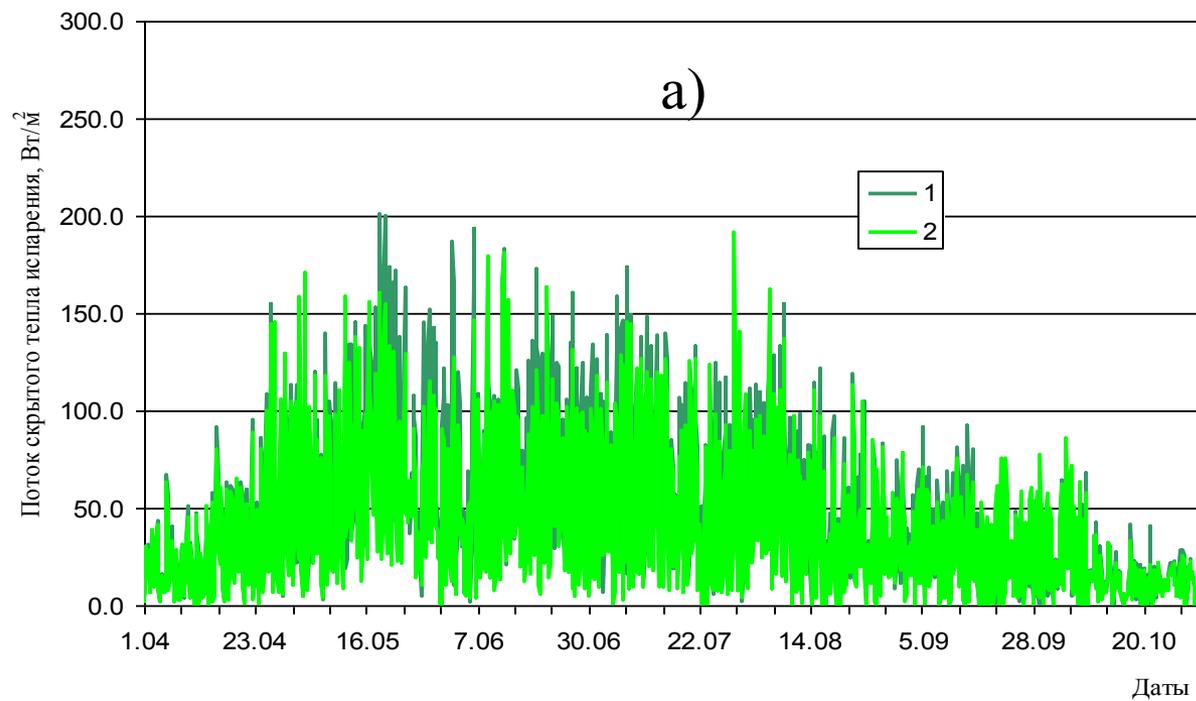
Распределения значений листового индекса LAI (а) и проективного покрытия В (б) по территории части ЦЧР площадью 227300 км², построенные по данным AVHRR на 12 ч. местного времени 07.06.2012



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 км² на 15 ч местного времени 30.07.2012 г.

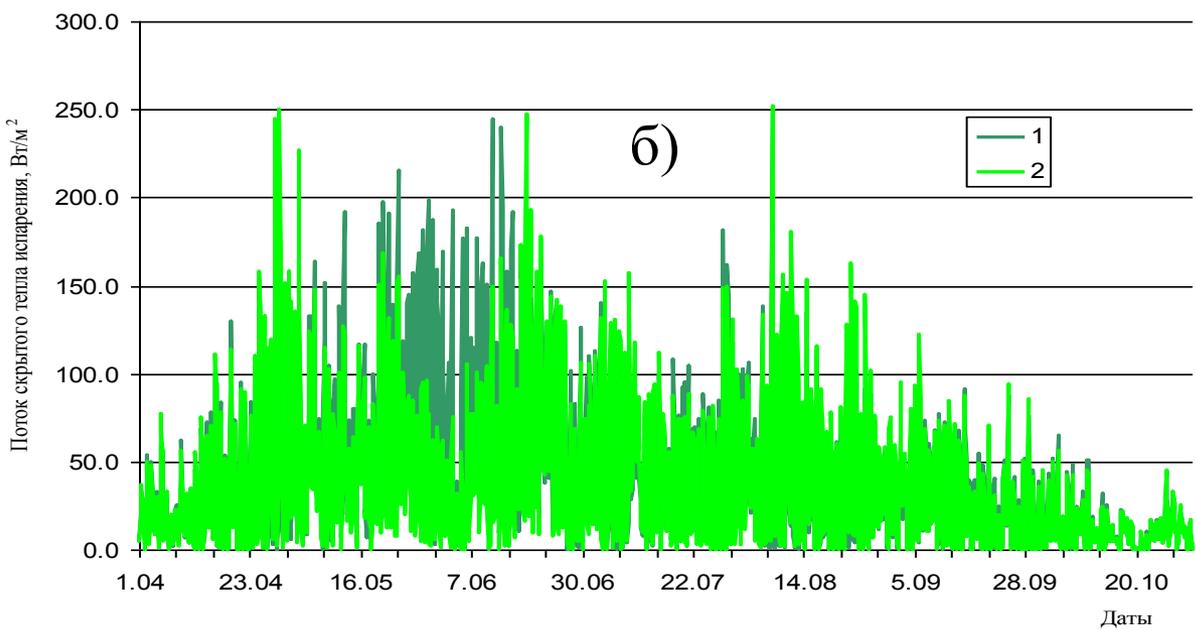


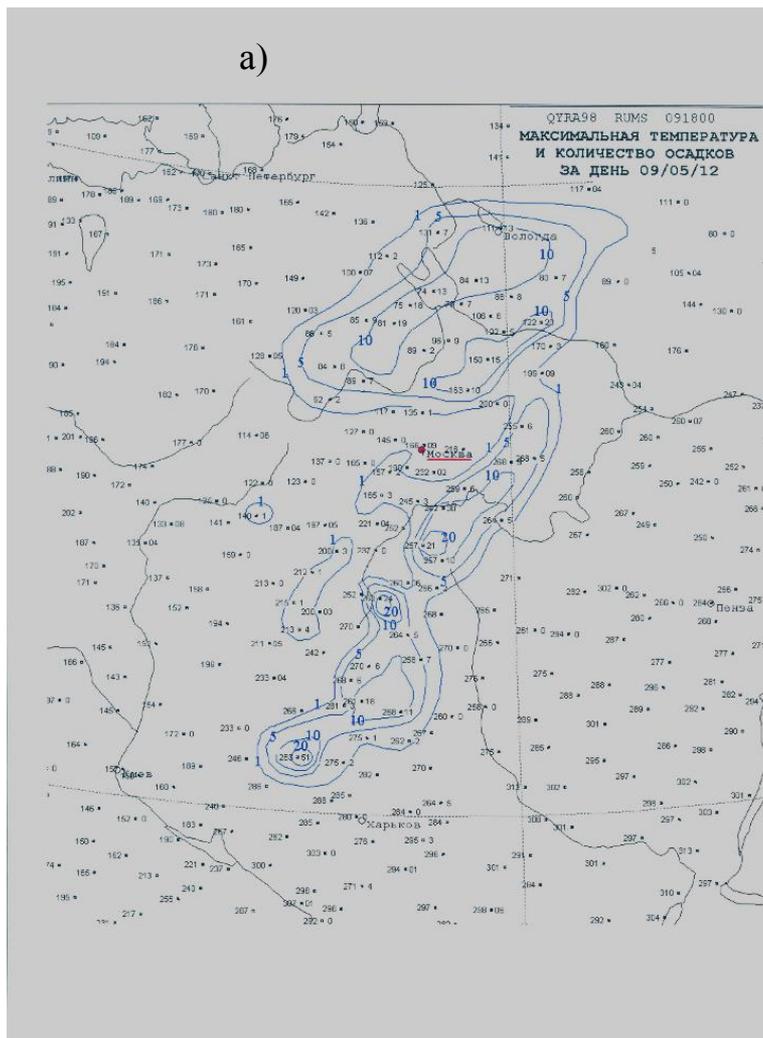
Радиационная температура подстилающей поверхности T_s (MODEL) (1) и T_{ls} (SEVIRI) (2) и температура поверхности растительного покрова T_f (MODEL) (3) и T_a (SEVIRI) (5), рассчитанные по модели по данным срочных трехчасовых наземных наблюдений на агрометеорологической станции Обоянь (1), (3) и определенные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



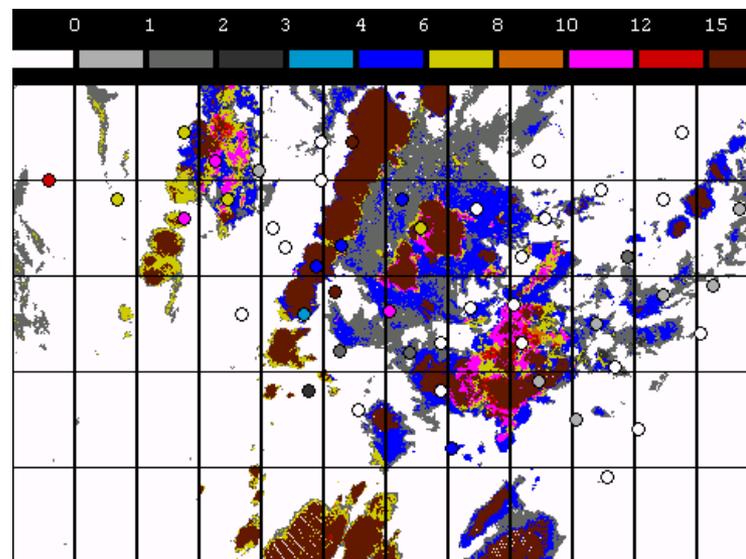
Рассчитанные по модели потоки скрытого тепла LE за каждые три часа для воднобалансовой станции Нижнедевицк (а) и агрометеорологической станции Рыльск (б) при использовании оценок температур

растительного покрова, полученных по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений T_f (1) и по данным SEVIRI T_a (2), за сезон вегетации 2012 г.

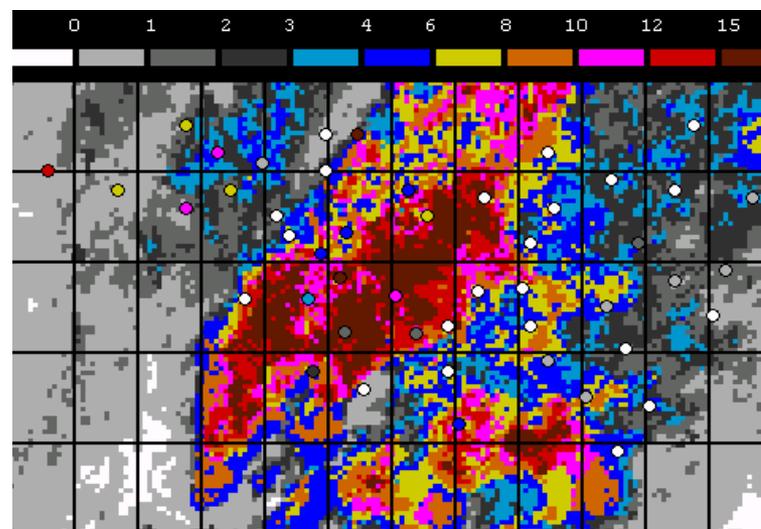




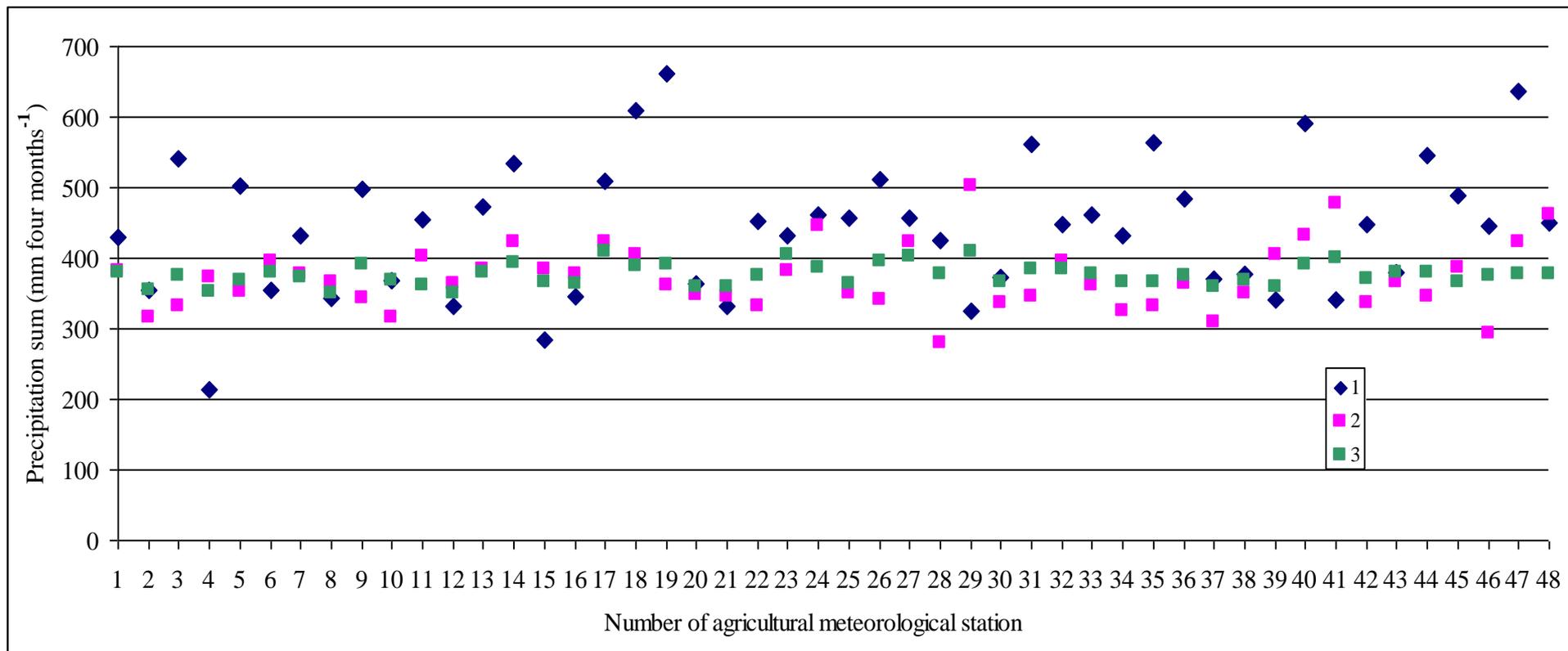
б)



в)



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

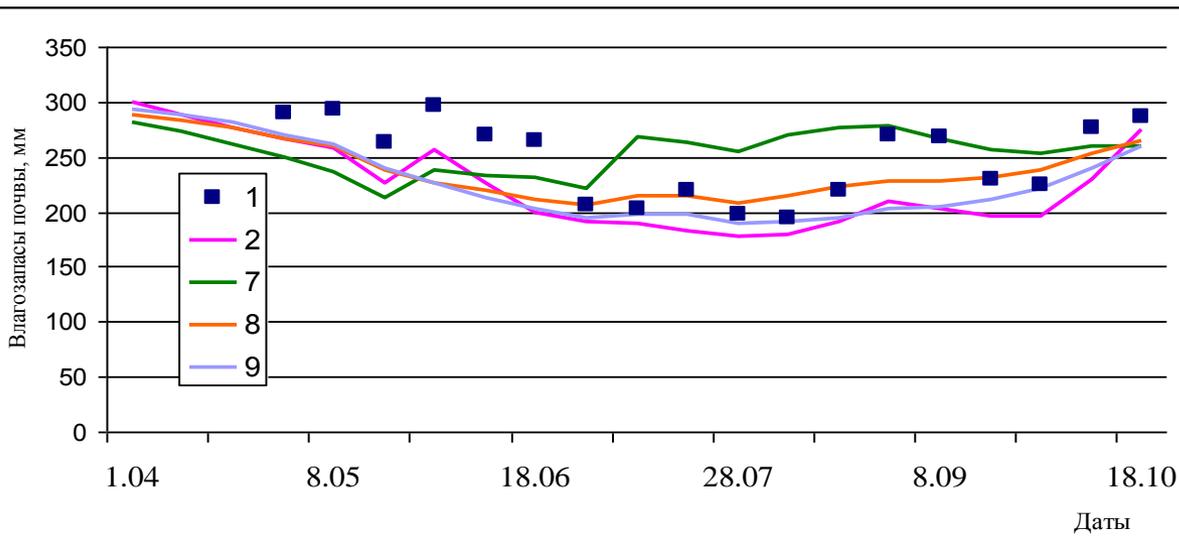
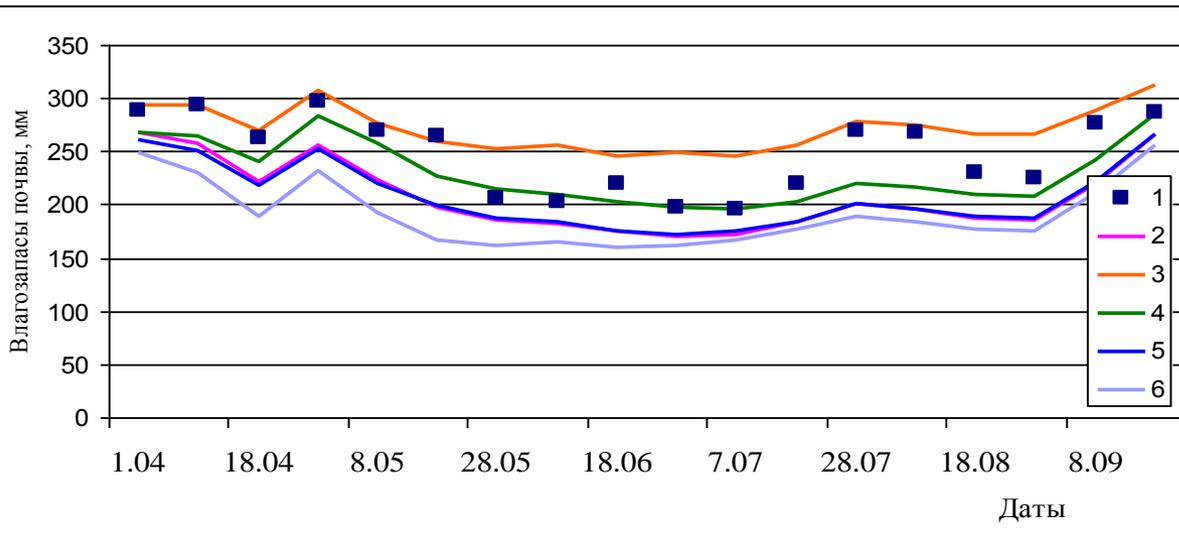


Суммы осадков за сезон вегетации 2012 г., определенные по данным наземных наблюдений на каждой агрометеорологической станции региона (1), по данным AVHRR/NOAA (2) и SEVIRI/Meteosat-10 (3). Агрометеорологические станции отмечены числами 1-48 у горизонтальной оси.

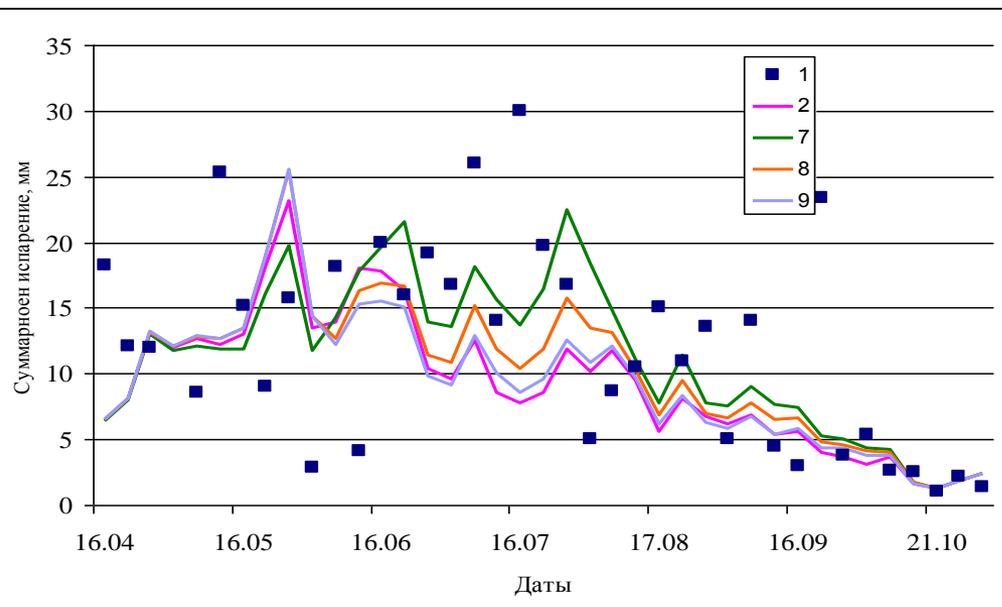
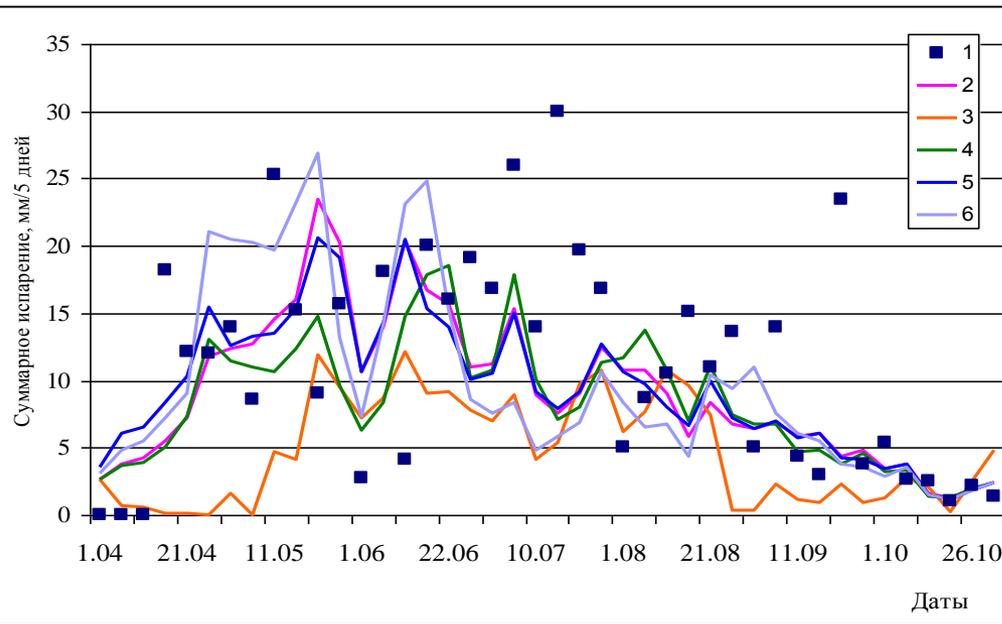


Месячные суммы осадков (мм) на агрометеостанции Курск за апрель 2008 - апрель 2013 гг., построенные по данным спутниковых и наземных измерений

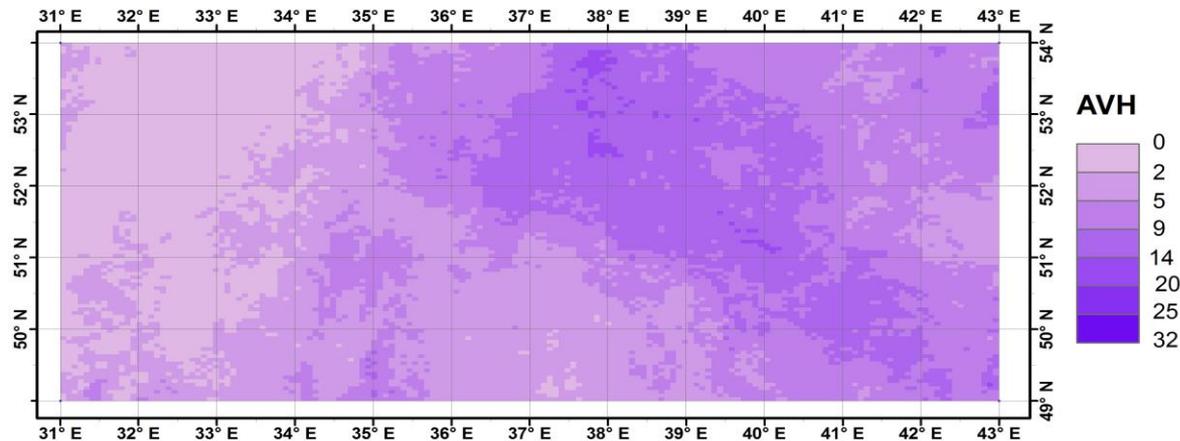
Влагозапасы почвы W за пентаду для сезона вегетации 2012 г., измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1) и рассчитанные по модели для агрометеорологической станции Рыльск: при оценках осадков по наземным данным (2-6) и оценках LAI по данным AVHRR для зерновых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



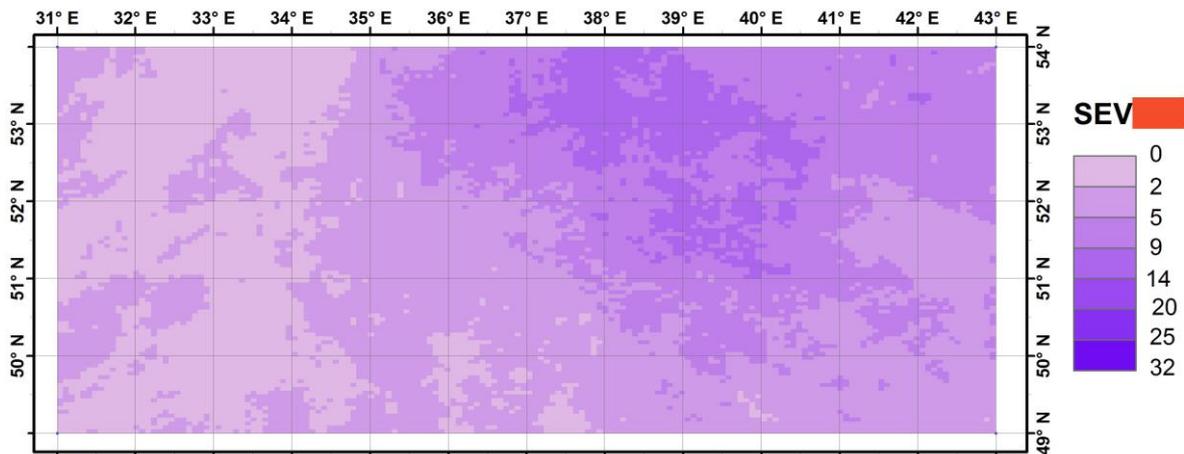
Значения суммарного испарения E_v за пентаду для сезона вегетации 2012 г., измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1) и рассчитанные по модели для агрометеорологической станции Рыльск: при оценках осадков по наземным данным (2-6) и оценках LAI по данным AVHRR 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).



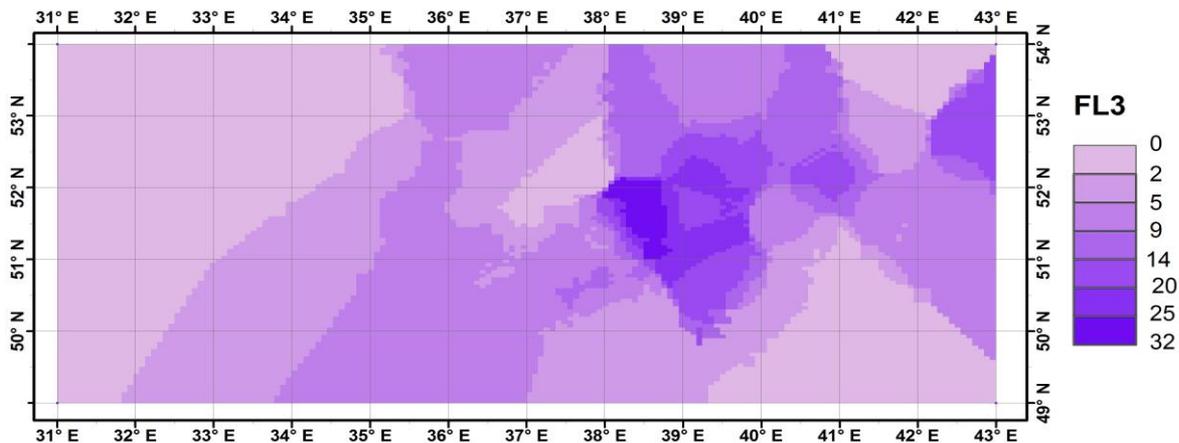
a)



б)

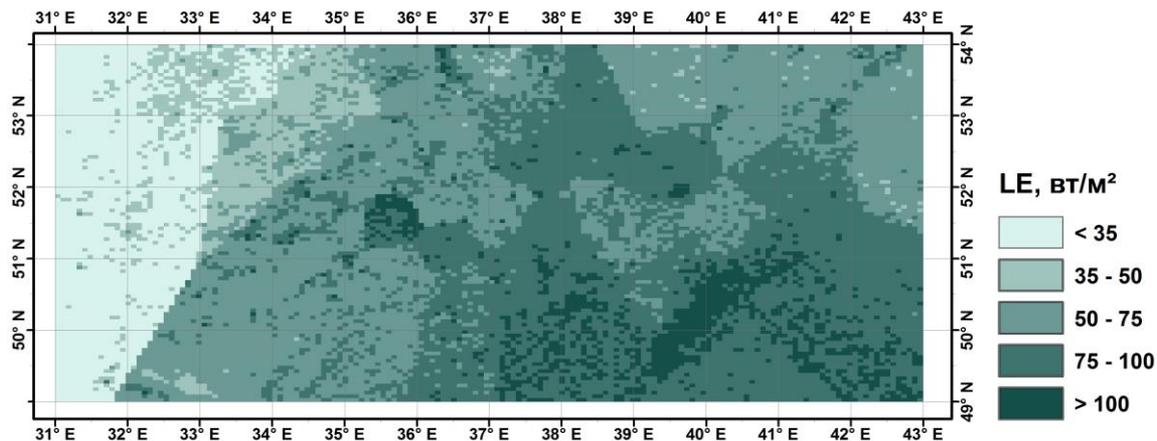


в)

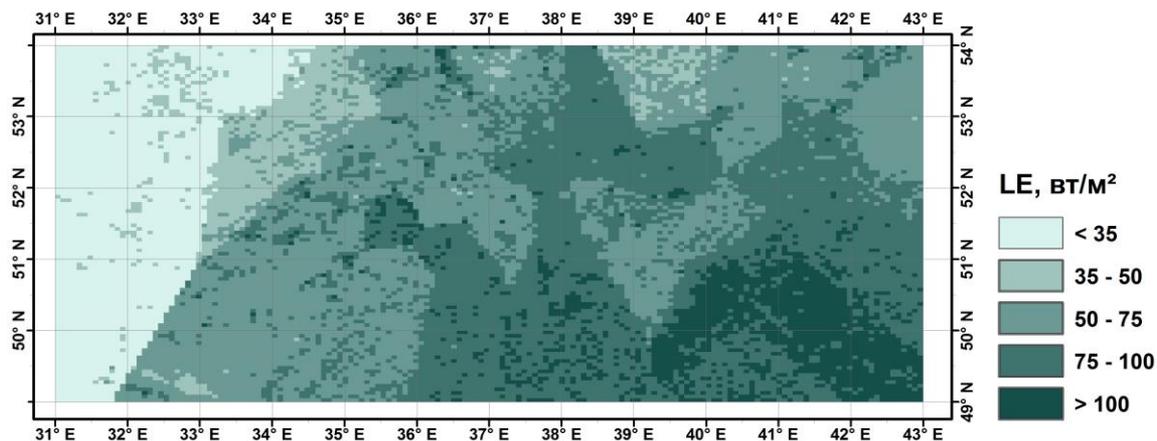


Распределения по площади части ЦЧР суточных сумм осадков за 09.10.2012, построенные по данным наземных наблюдений (а), AVHRR/NOAA (б), SEVIRI/Meteosat-10 (в)

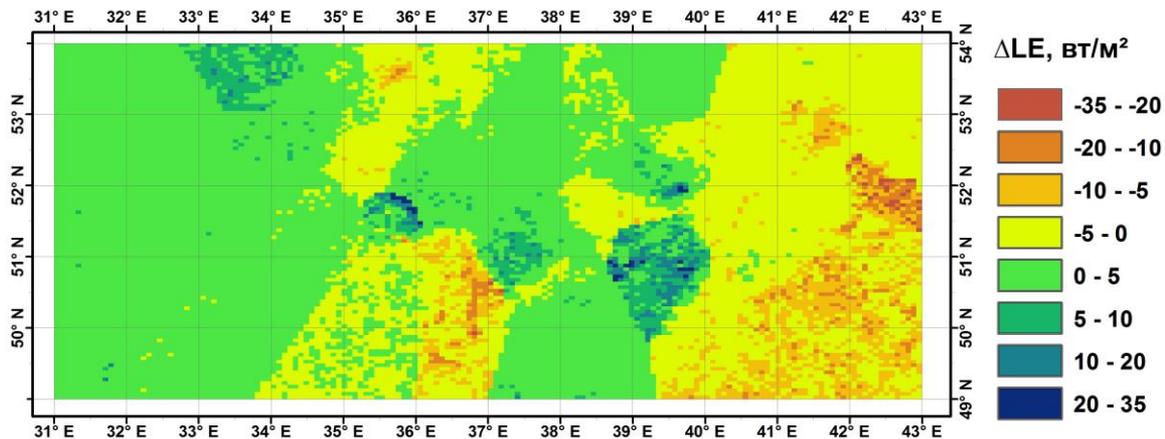
а)



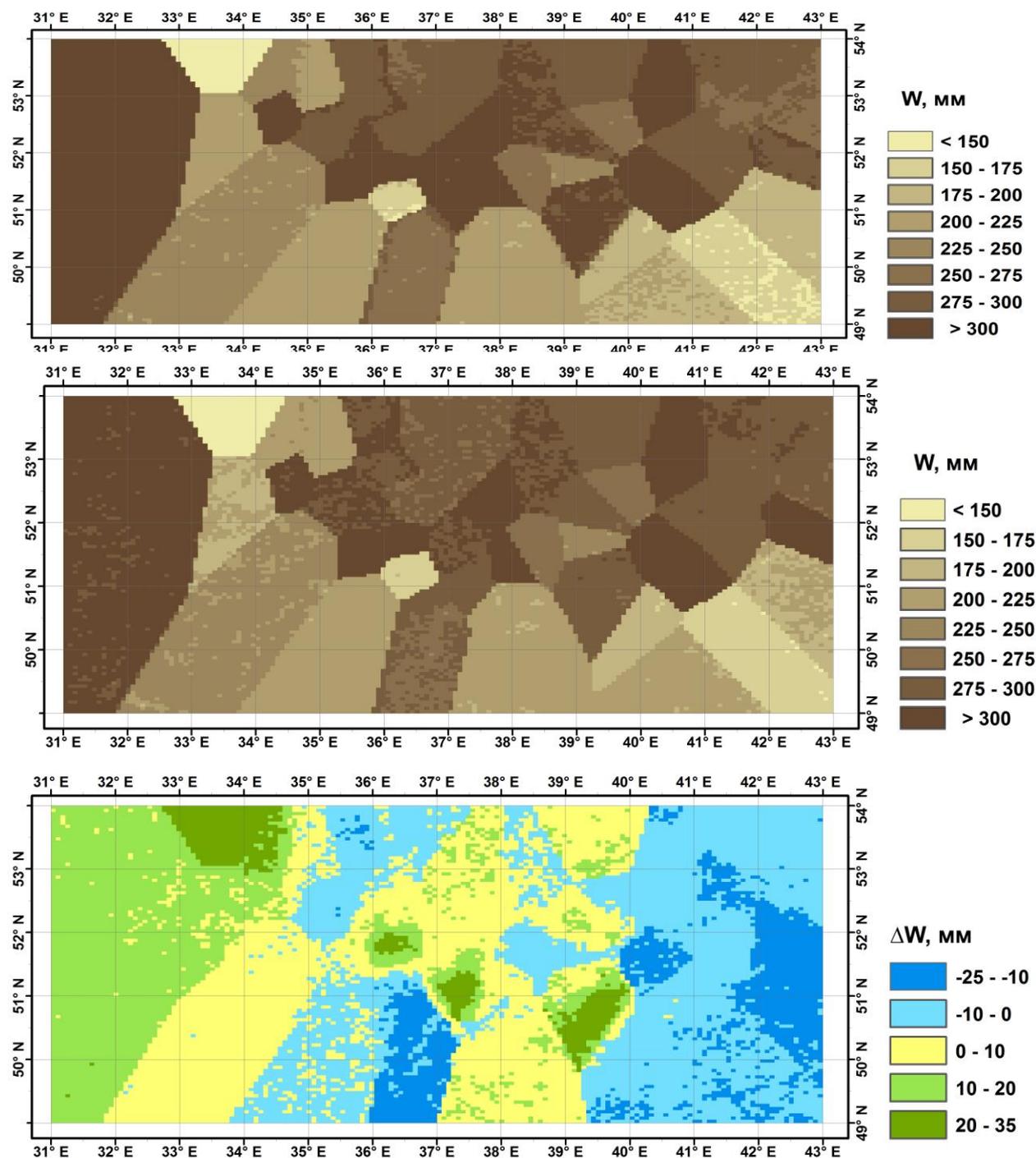
б)



в)



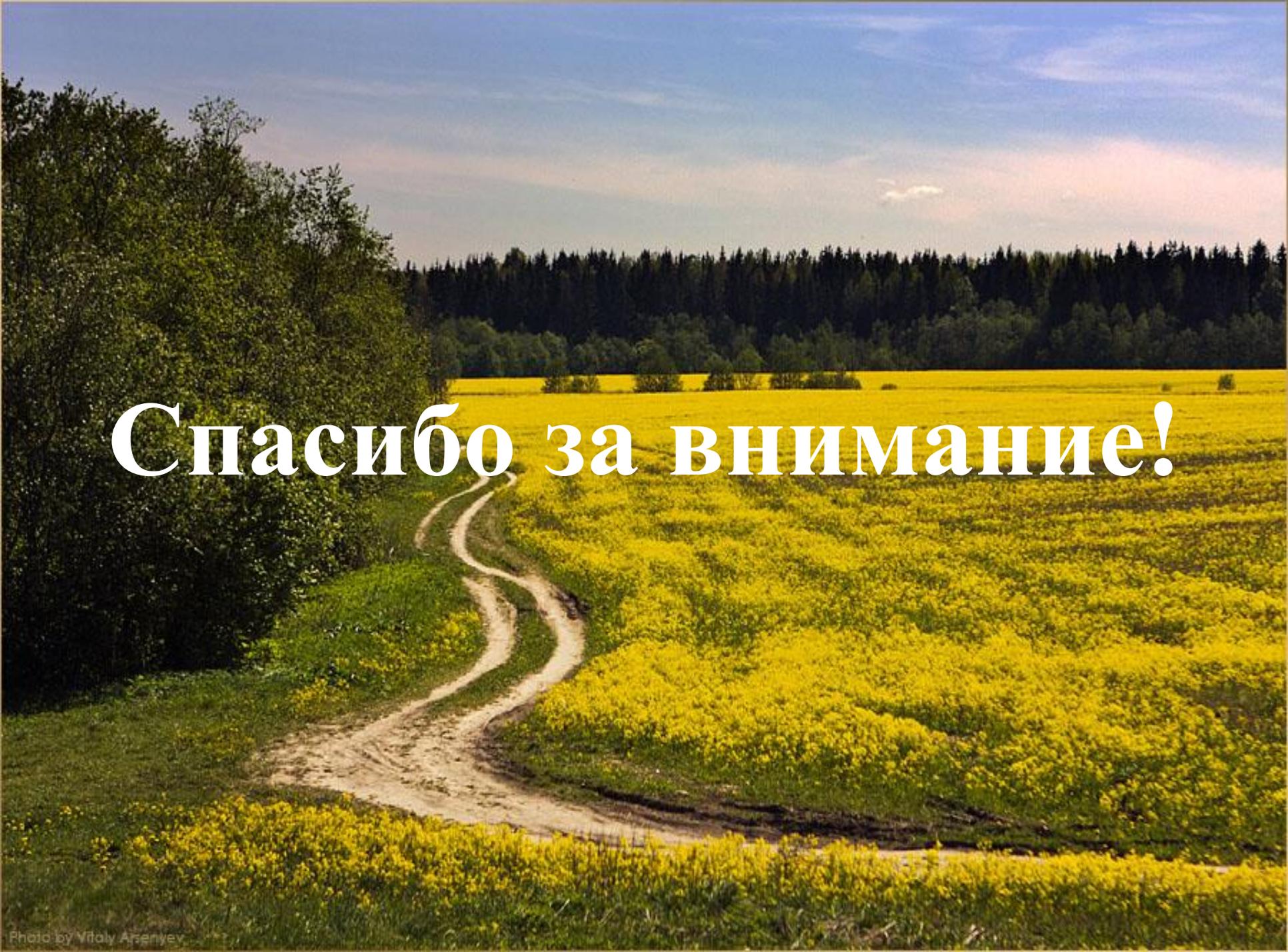
Потоки скрытого тепла за сутки LE (Вт/м²), рассчитанные по модели с использованием оценок суточных сумм осадков, построенных по данным наземных измерений (а) и по данным SEVIRI (б), и их разность (в) для территории части ЦЧР площадью 227300 км² на 15 мая 2012 г.



Влагозапасы
почвы W (мм),
рассчитанные по
модели

с использованием
оценок суточных
сумм осадков по
данным наземных
измерений (а) и
по данным
SEVIRI (б) и их
разность (в) для
территории части
ЦЧР площадью
 227300 км^2
на 15 мая 2012 г.

Предложенный способ описания процессов взаимодействия поверхности суши с атмосферой с помощью физико-математической модели, рассчитанной на использование данных различных ИСЗ (полярно-орбитальных и геостационарных) о состоянии подстилающей поверхности, продемонстрировал возможность построения полей значений характеристик водного и теплового режимов обширных покрытых растительностью территорий, в том числе характеризующихся недостатком наземных наблюдений. Несомненные достоинства данного подхода – большой пространственный охват, высокая частота получения результатов и их приемлемая точность.



Спасибо за внимание!

Температура воздуха у поверхности растительного покрова

$$T_a = a_1 T_4 + a_2 (T_4 - T_5) + a_3$$

T_4 и T_5 – яркостные температуры поверхности, измеренные в 4-ом (10,5-11,5 μm) и 5-ом (11,5-12,5 μm) каналах AVHRR

Оценка температуры поверхности почвы

$$T_{sg} = b_1 T_4 + b_2 (T_4 - T_5) + b_3 (\varepsilon_4 + \varepsilon_5) / 2 + b_4 (\varepsilon_4 - \varepsilon_5) + b_5$$

ε_4 и ε_5 – оценки излучательной способности для 4-го и 5-го каналов AVHRR, полученные с привлечением априорных моделей ε , разработанных для 31-го и 32-го каналов MODIS (EOS/Terra и Aqua) для разных типов типичных поверхностей, а также с использованием эмпирических соотношений между ε и вегетационным индексом NDVI и/или между ε и проективным покрытием B

Излучательная способность подстилающей поверхности

$$\varepsilon = \varepsilon_v B + \varepsilon_g (1 - B) + 0.06 B (1 - B)$$

ε_v и ε_g - “типичные” значения для различных почв и видов растительности, B – проективное покрытие

Вегетационный индекс

$$NDVI = (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1)$$

A_1 , A_2 – значения альбедо, измеренные в 1-ом и 2-ом каналах AVHRR

Проективное покрытие растительностью

$$B = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_g) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_g)$$

NDVI_v и NDVI_g - вегетационные индексы для растительности и голой почвы, определяющиеся как максимальное и минимальное значения NDVI в пределах пиксела

Эффективная радиационная температура подстилающей поверхности

При допущениях $T_f = T_a$ and $T_g = T_{sg}$

$$T_{s.\text{eff}} = BT_f + (1-B)T_g$$

$$T_{s.\text{eff}} = BT_a + (1-B)T_{sg}$$