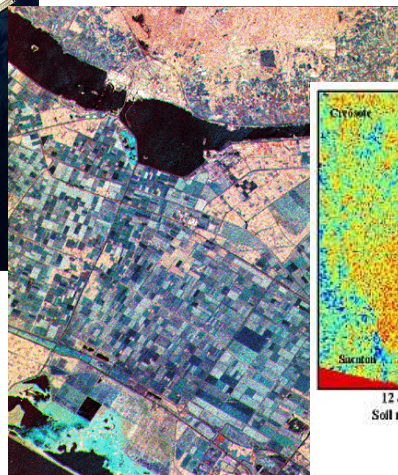


МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ ДЛЯ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ ЕТР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е.Л.Музылев¹, А.Б.Успенский²,
З.П.Старцева¹



Evaporation from bare soil

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

Soil water transfer equation

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

Foliage water potential

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

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

Sensible heat

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

Heat equation

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

Transpiration

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

Water extraction by plant roots

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

Hydraulic conductivity coefficient

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

Stomatal resistance

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



¹ Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

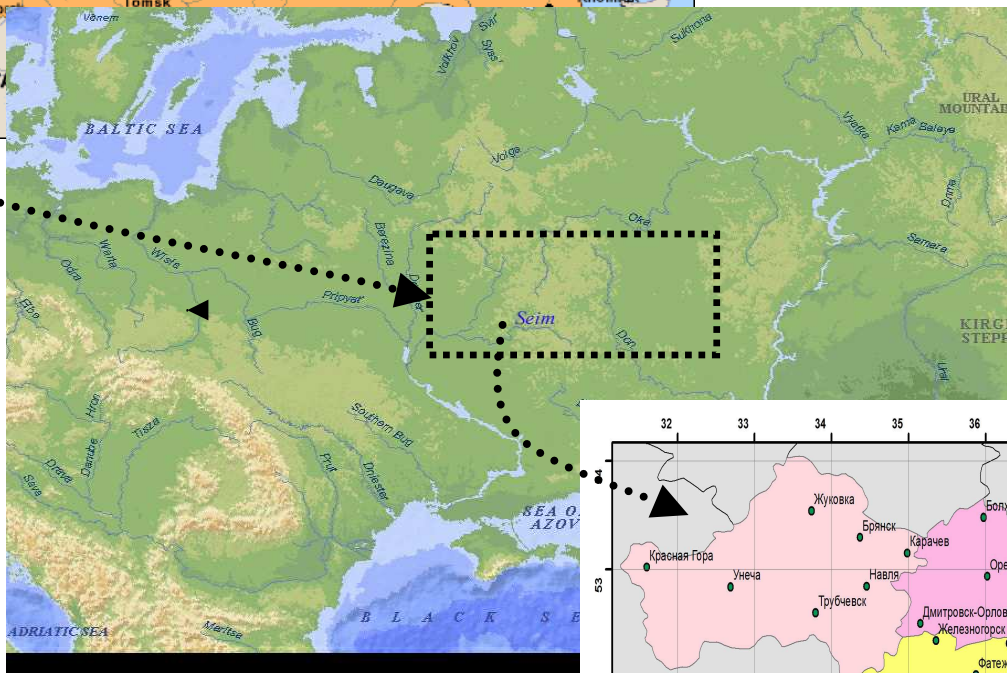
² Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Москва

E-mail: muzylev@aqua.laser.ru

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Цели исследований

- развитие и усовершенствование технологий получения оценок характеристик подстилающей поверхности (температур поверхностей растительного покрова T_a и почвы T_{sg} , эффективной радиационной температуры поверхности $T_{s,eff}$, индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью B) по данным AVHRR/NOAA при безоблачной атмосфере, температуры подстилающей поверхности (ТПП) и LAI по данным MODIS/Terra и Aqua, а также разработка технологии определения ТПП по данным SEVIRI/Meteosat-9; анализ достоверности этих оценок;
- разработка способов использования спутниковых оценок названных характеристик в качестве параметров или входных переменных модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), в том числе создание и отладка процедур учета в модели пространственной неоднородности полей этих оценок, а также определяемых по данным наземных наблюдений метеорологических характеристик;
- получение с помощью адаптированной к спутниковым данным модели SVAT оценок составляющих водного и теплового балансов для участков территории лесостепной зоны Европейской части России



A map of the Central Federal District of Russia, showing its administrative boundaries and major cities. The map is color-coded by region: Tula (pink), Bryansk (light blue), Lipetsk (light green), Tambov (blue), Voronezh (light pink), and others. Major cities like Moscow, Nizhny Novgorod, and Kazan are also visible. The map includes a coordinate grid with latitude and longitude markings.

Модель SVAT предназначена для расчета суммарного испарения, влагосодержания почвы, вертикальных потоков скрытого и явного тепла, вертикальных профилей влажности и температуры почвы, температуры поверхностей почвы и растительного покрова, а также радиационной температуры при учете их площадной неоднородности, а также пространственной изменчивости метеорологических характеристик



Краткое описание модели SVAT

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

Поглощение воды корнями растений

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

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

Водный потенциал
листьев

Коэффициент гидрав-
лической проводимости

Устьичное
сопротивление

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

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

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

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

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

Радиационная температура поверхности T_s

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

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

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

Учет различий типов почв и видов растительности производится путем ввода в модель распределений значений ее параметров по площади исследуемого участка. Тип почвы характеризуется объемным весом, пористостью, максимальной гигроскопичностью, наименьшей полевой влагоемкостью, коэффициентом фильтрации. Распределения типов почв брались с региональных почвенных карт. Неоднородность растительного покрова представлялась устьичным сопротивлением, коэффициентом шероховатости, зависящим от высоты растений, и листовым индексом LAI.

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

Адаптация модели к спутниковым оценкам характеристик подстилающей поверхности производилась с помощью перехода к вычислительной сетке размером 3x3 пиксела ИК каналов AVHRR (~7x5 км²). AVHRR-оценки (T_a , T_{sg} , $T_{s.eff}$, NDVI, E, B, LAI), MODIS-оценки (ТПП T_{ls} , E, NDVI, LAI) и SEVIRI-оценки (T_{ls}) были приведены к этой сетке. В узлах сетки были определены значения параметров и входных переменных модели и производились вычисления суммарного испарения, влагосодержания почвы и других составляющих водного и теплового балансов, а также температуры поверхности растительного покрова T_f , почвы T_g и радиационной температуры поверхности T_s .

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.

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

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

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

Эффективная радиационная температура подстилающей поверхности

$$T_{s,eff} = BT_f + (1-B)T_g$$

При допущениях $T_f = T_a$ and $T_g = T_{sg}$ $T_{s,eff} = BT_a + (1-B)T_{sg}$

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

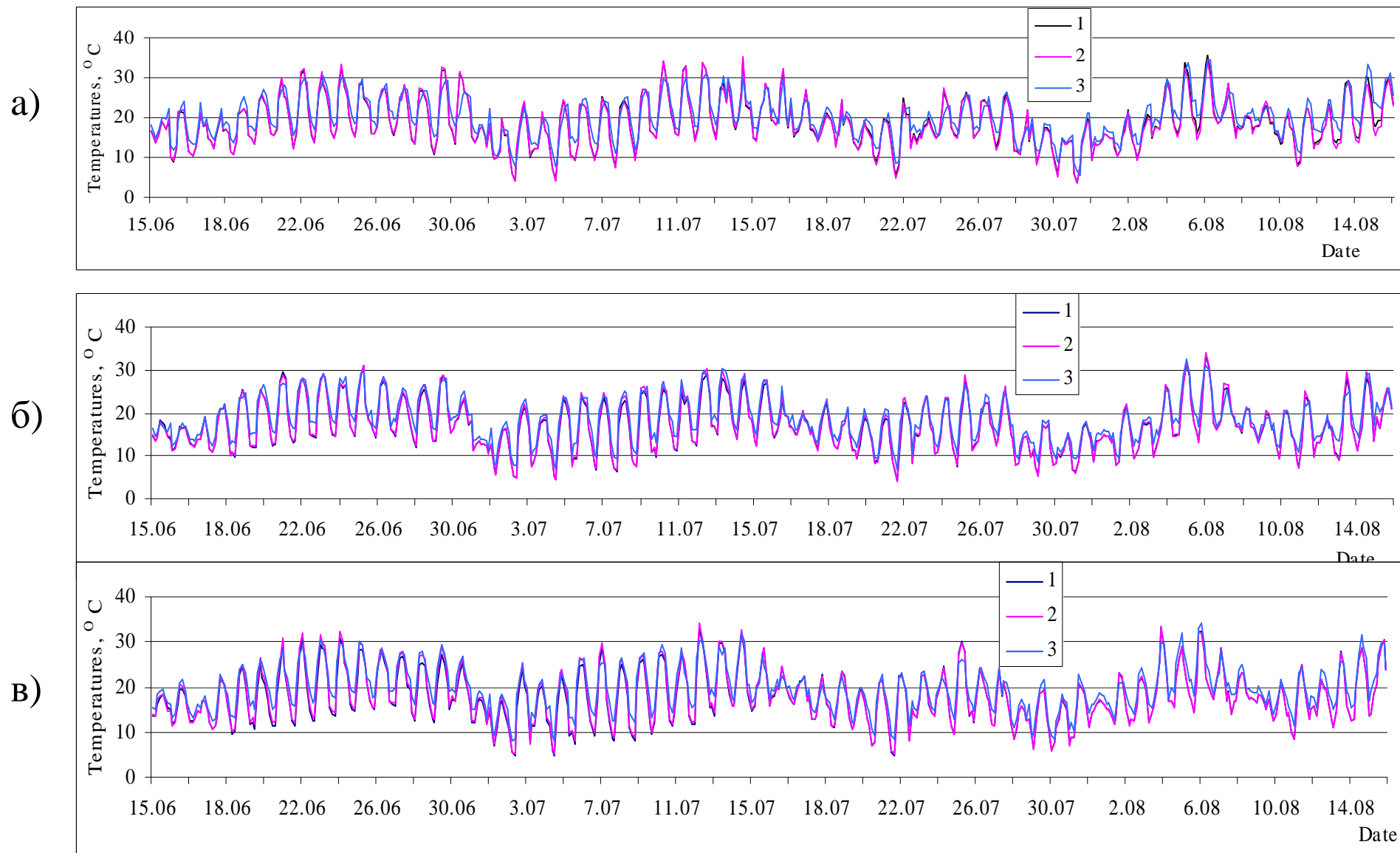
$LAI = NDVI * 1.71 + 0.48$ – для травяных культур

Средние квадратические отклонения для T_a , T_{sg} и $T_{s,eff}$ заключены в пределах 2.4-2.8, 3.5-4.9 и 2.4-3.6°C, соответственно. 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.

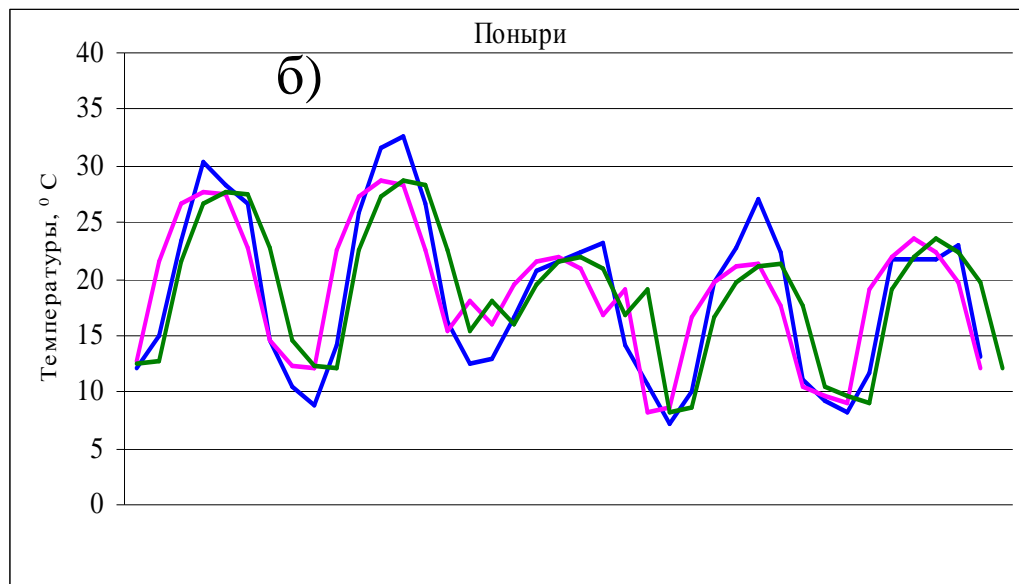
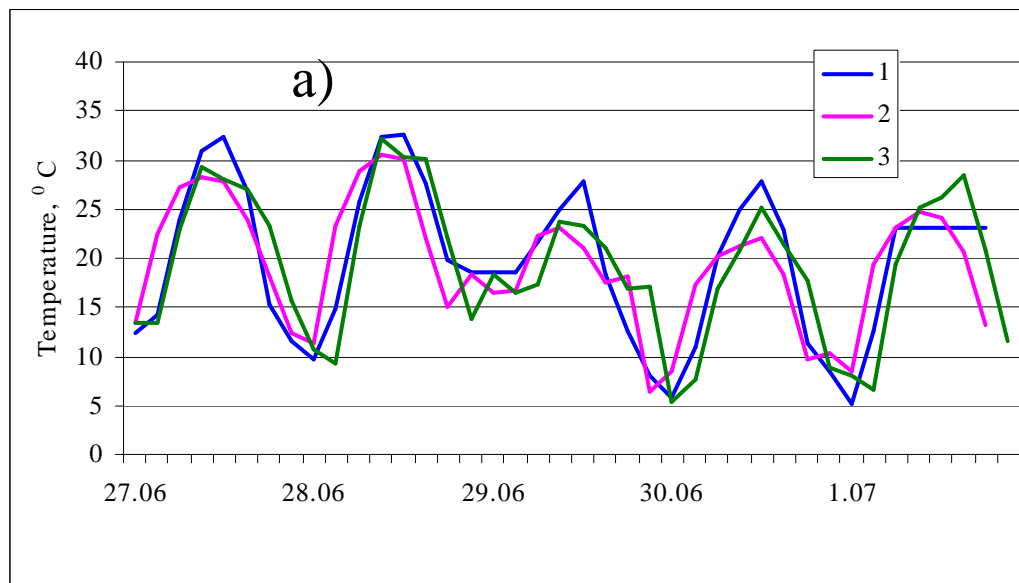
Файлы с оценками T_{ls} , NDVI, LAI и E по данным MODIS/Terra и Aqua были получены через вебсайт LP DAAC. Для T_{ls} были загружены LST/E Daily L3 product (MOD11B1) с пространственным разрешением ~ 4.8 км и LST/E 5-Min L2 product (MOD11_L2) с разрешением ~ 1 км. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем эти оценки получают за временной период в 8 дней. Затем с помощью специально созданного программного обеспечения были выполнены форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов спутникового зондирования. 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/3. Согласно результатам сопоставлений оценки T_{ls} (MOD11B1) для большинства сроков оказались более достоверны, чем оценки T_{ls} (MOD11_L2). Значения максимальной абсолютной разности оценок T_{ls} (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR/3) лежат в диапазоне $2.0-3.0^{\circ}\text{C}$, а среднеквадратическое отклонение оценок T_{ls} (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышает 3.5°C .

МЕТОДЫ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ SEVIRI И ПОСТРОЕНИЯ ОЦЕНОК ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (T_{ls})

Предложенный метод получения оценок T_{ls} and E по 15-минутным данным радиометра SEVIRI, установленного на геостационарных метеоспутниках Meteosat-8, -9, 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 спутниковых оценок T_{ls} проводился путём сопоставления с синхронными независимыми оценками, полученными по данным SEVIRI в спутниковом центре EUMETSAT LSA SAF (Прикладном центре анализа спутниковых данных о поверхности Земли, Лиссабон, Португалия). Величины среднеквадратического отклонения между оценками T_{ls} (НИЦ “Планета”) и T_{ls} (LSA SAF) находятся в диапазоне 0.4-1.9 К для различных дней и сроков за период с сентября 2008 по сентябрь 2009 гг.

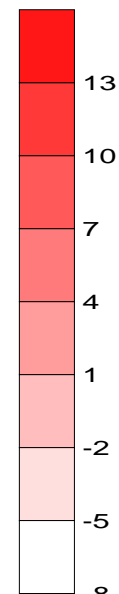
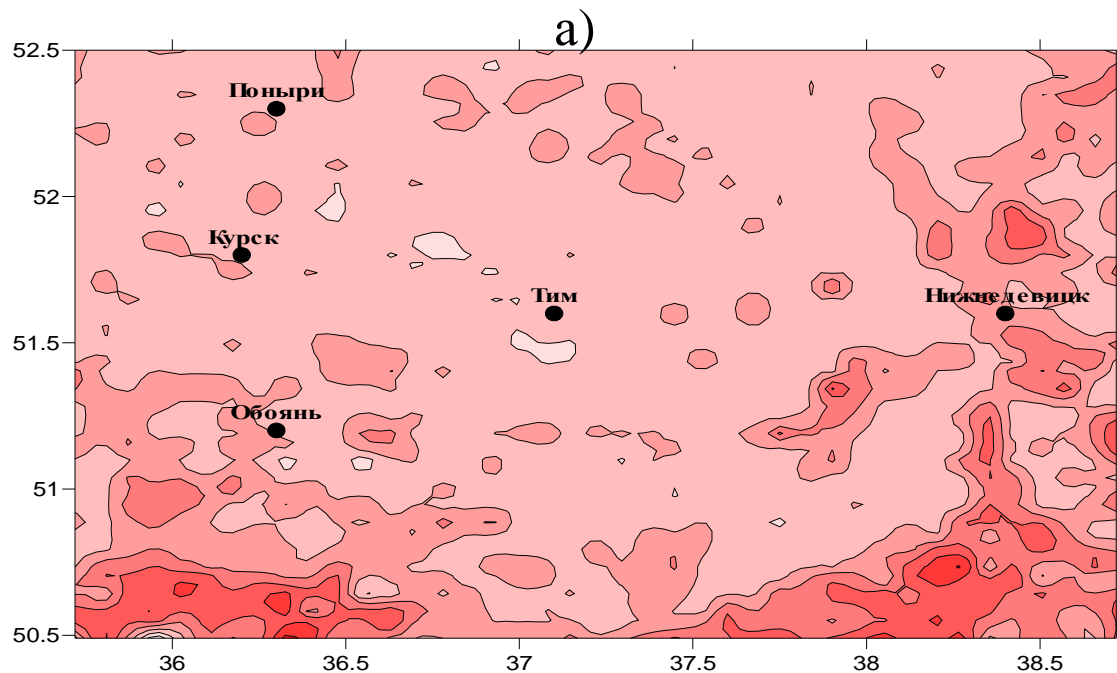


Температура подстилающей поверхности, рассчитанная по модели с использованием оценок LAI и В по данным AVHRR для зерновых (1) и оценок LAI по данным MODIS (2). (3) - температура воздуха, измеренная на воднобалансовой станции Нижнедевицк (а), агрометеостанциях Поныри (б) и Тим (в), сезон вегетации 2009 г.

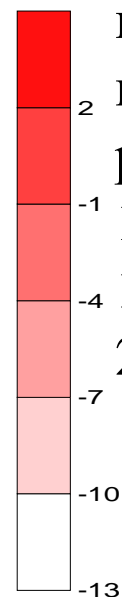
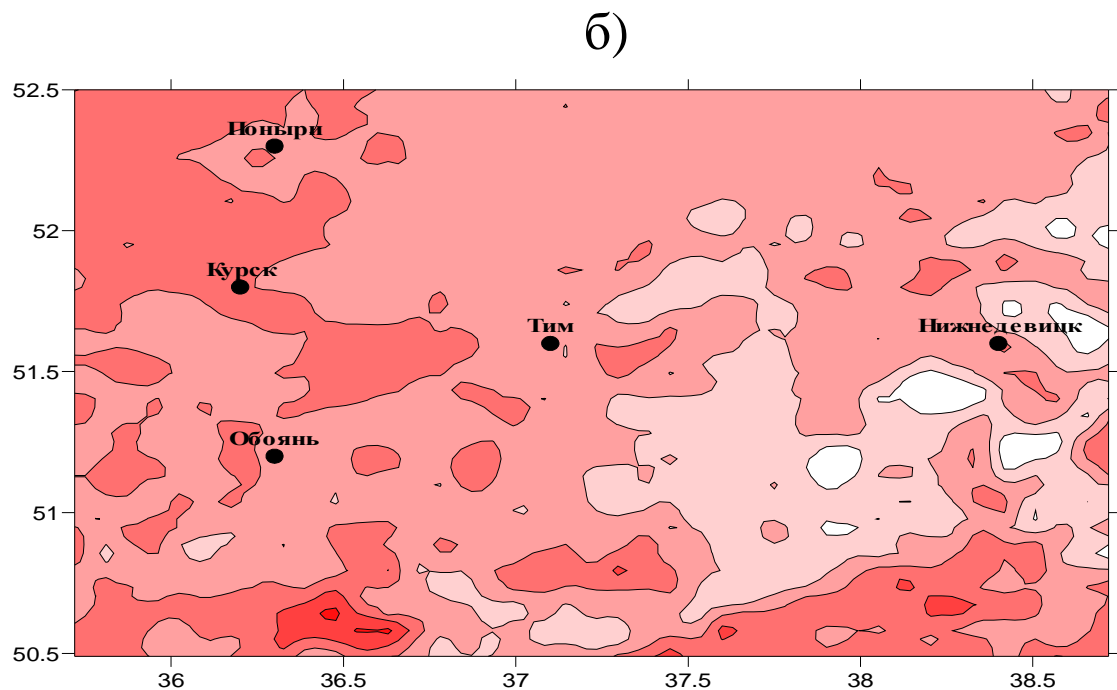


Температура подстилающей поверхности T_{ls} , определенная по данным SEVIRI/Meteosat-9 (1) и рассчитанная по модели по срочным трехчасовым данным наземных наблюдений (3) за интервал 28.06.-03.07.2009 г. для агрометеостанций Ливны (а) и Поньри (а). (2) – фактическая температура воздуха.

СКО для T_{ls} и T_a составило $3.6-5.0^{\circ}\text{C}$, а для T_{ls} и T_f – $4.1-4.8^{\circ}\text{C}$, что вполне приемлемо для сопоставления таких разных характеристик.

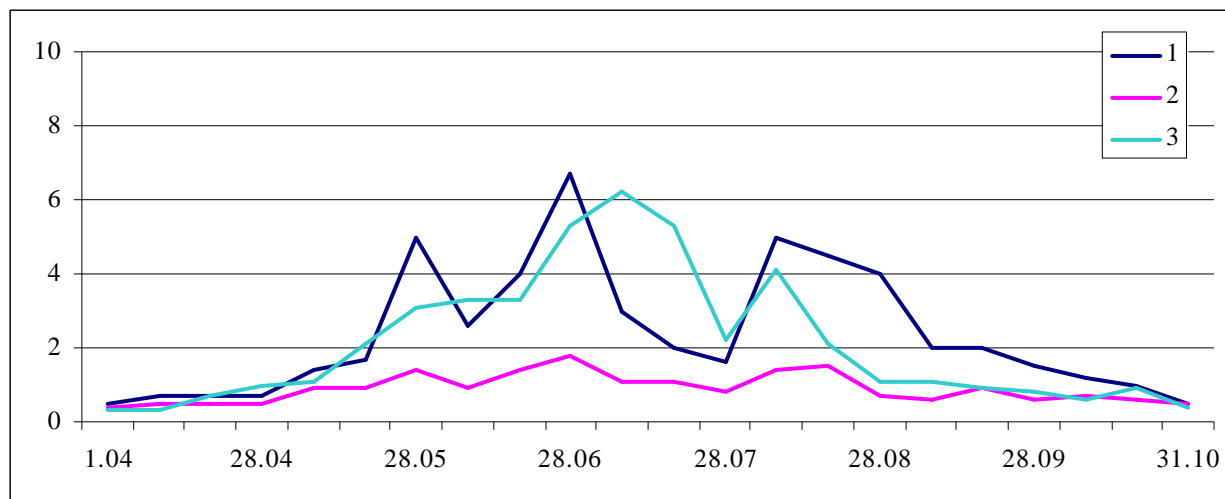


Распределение разности температур подстилающей поверхности $\Delta T = T_{s,eff} (AVHRR) - T_s(MODEL)$ для исследуемой территории площадью $\sim 15000 \text{ км}^2$ с пространственным разрешением $\sim 5 \text{ км}$ для 14 час. местного времени 1 июня (а) и 17 августа (б) 2009 г.

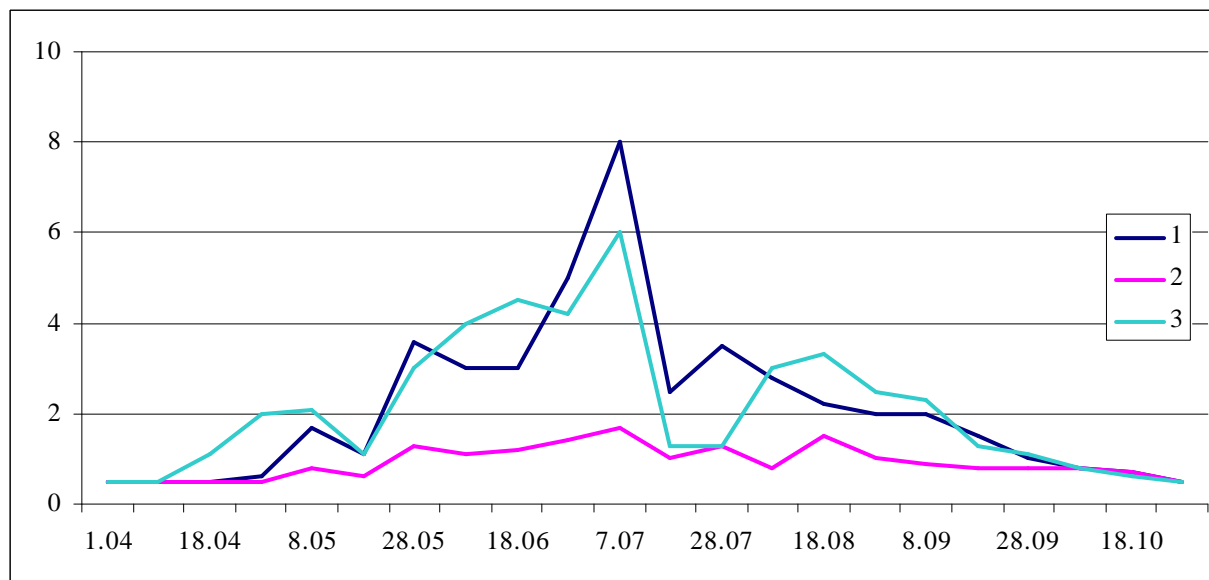


Разработка способов усвоения в модели SVAT спутниковых оценок характеристик растительности и метеохарактеристик с учетом их пространственной изменчивости включала: 1) подтверждение возможности замены используемых в качестве параметров модели величин LAI и В, определенных по данным наземных наблюдений, на их спутниковые оценки; 2) введение в модель спутниковых оценок ТПП в качестве переменной при согласовании моментов времени спутниковых и наземных наблюдений; 3) разработку способа учета в модели пространственных распределений спутниковых оценок LAI, В, ТПП путем ввода их значений в каждом узле вычислительной сетки модели; 4) использование процедуры весовой интерполяции сетевых наблюдений для получения распределений по поверхности рассматриваемой территории интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха; 5) расчеты составляющих водного и теплового балансов для всей рассматриваемой территории при задании LAI, В и ТПП по спутниковым данным радиометров AVHRR, MODIS и SEVIRI для сезонов вегетации 2003-2009 гг.

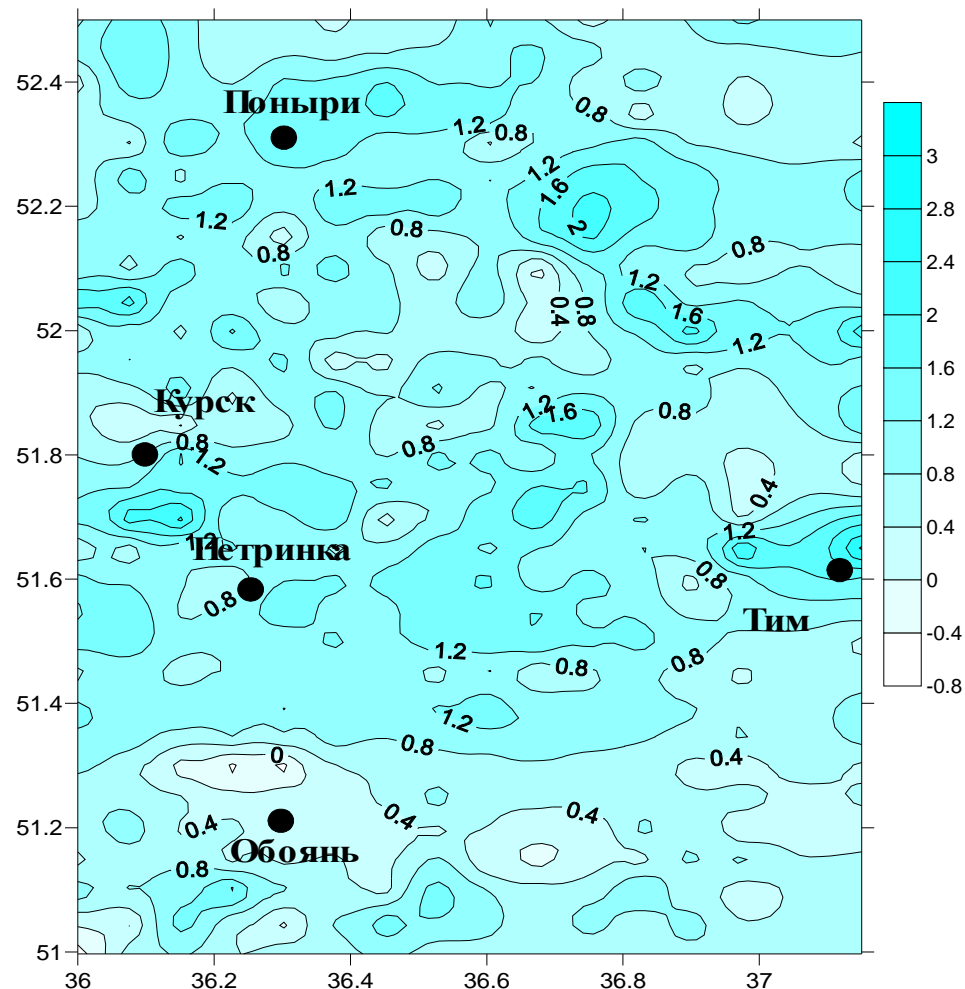
а)



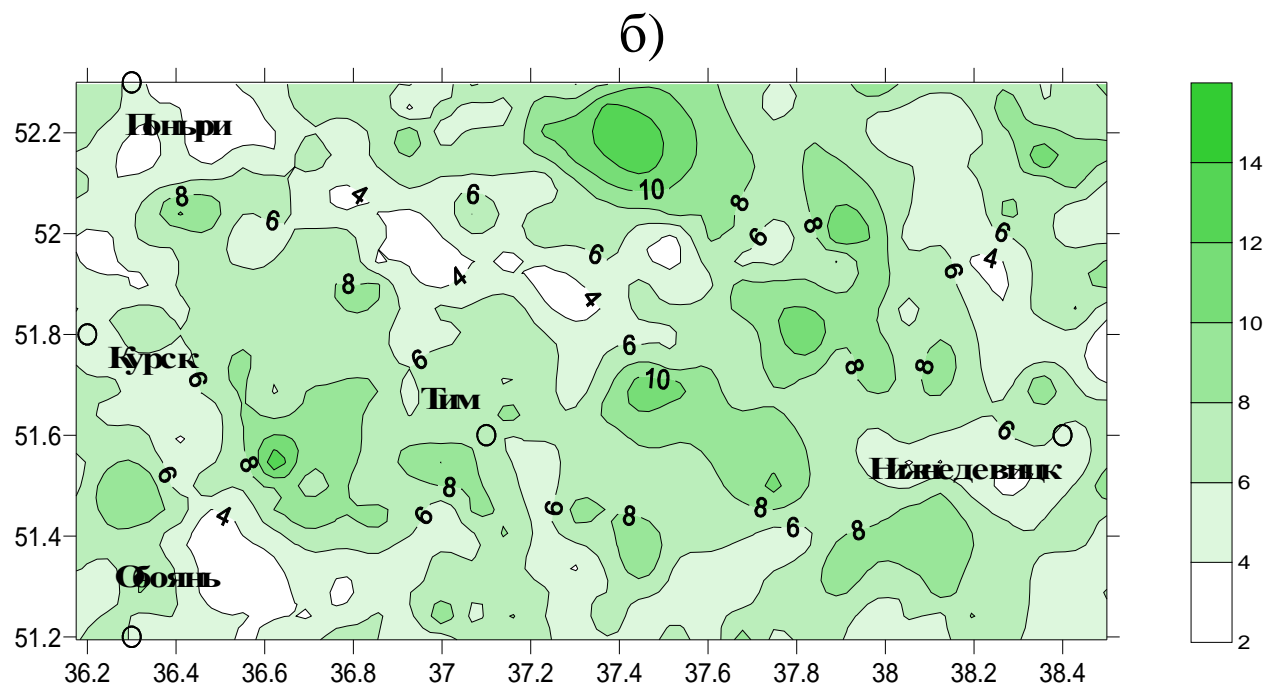
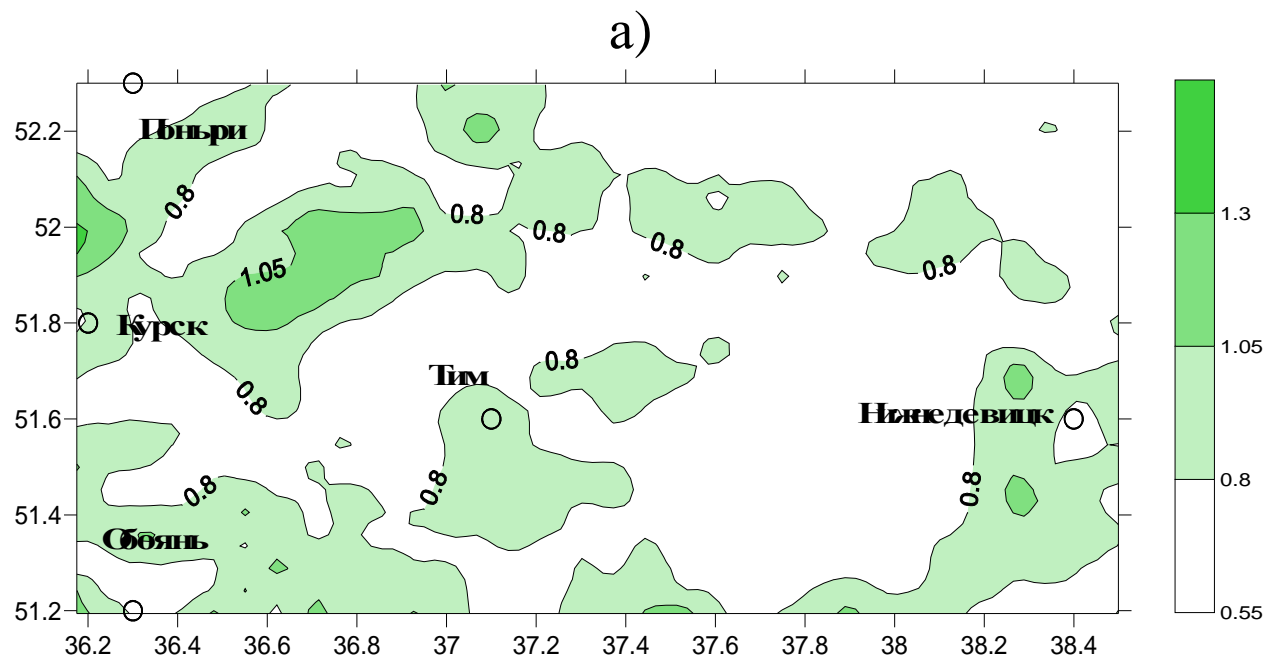
б)



Оценки LAI для агрометеостанций Нижнедевицк (а) и Поныри (б), построенные по данным AVHRR для зерновых (1) и травяных (2) культур и по данным MODIS (3) за отдельные сроки сезона вегетации 2009 г.

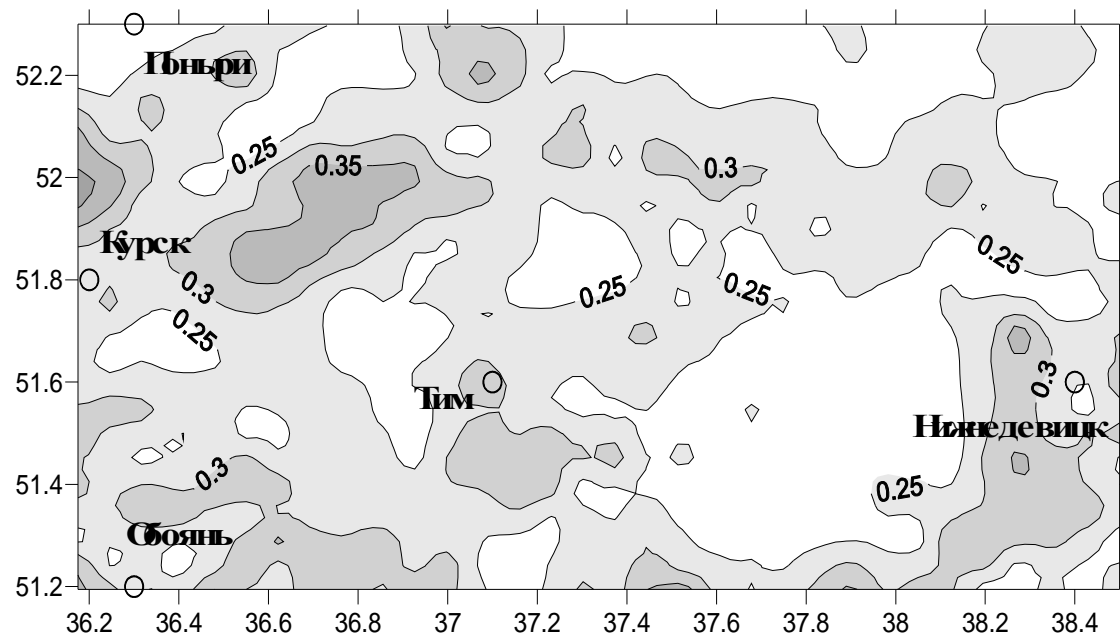


Разности значений листового индекса $LAI(MODIS) - LAI(AVHRR)$ для исследуемого участка территории Центрально-Черноземной зоны, расположенного в Курской и Воронежской областях, на 14 ч. местного времени 6 июня 2008 г.

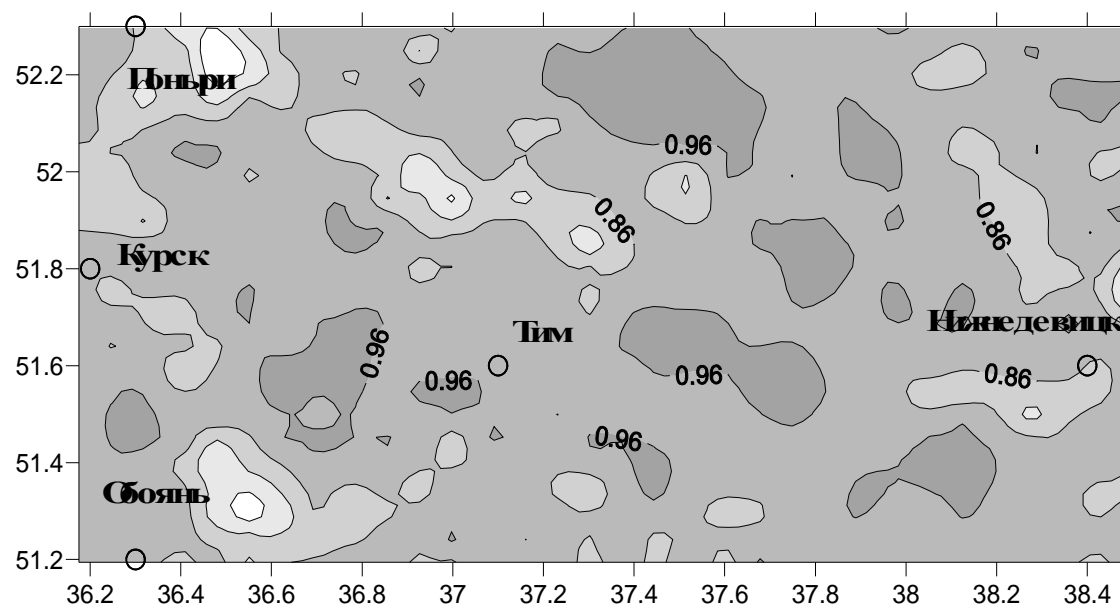


Распределения
листового индекса
LAI, построенные
по данным
AVHRR/3 для
исследуемой
территории
площадью 15000
км² на 11 ч. 02 мая
(а) и на 9 часов 01
июня (б) 2009 г.
(Время местное).

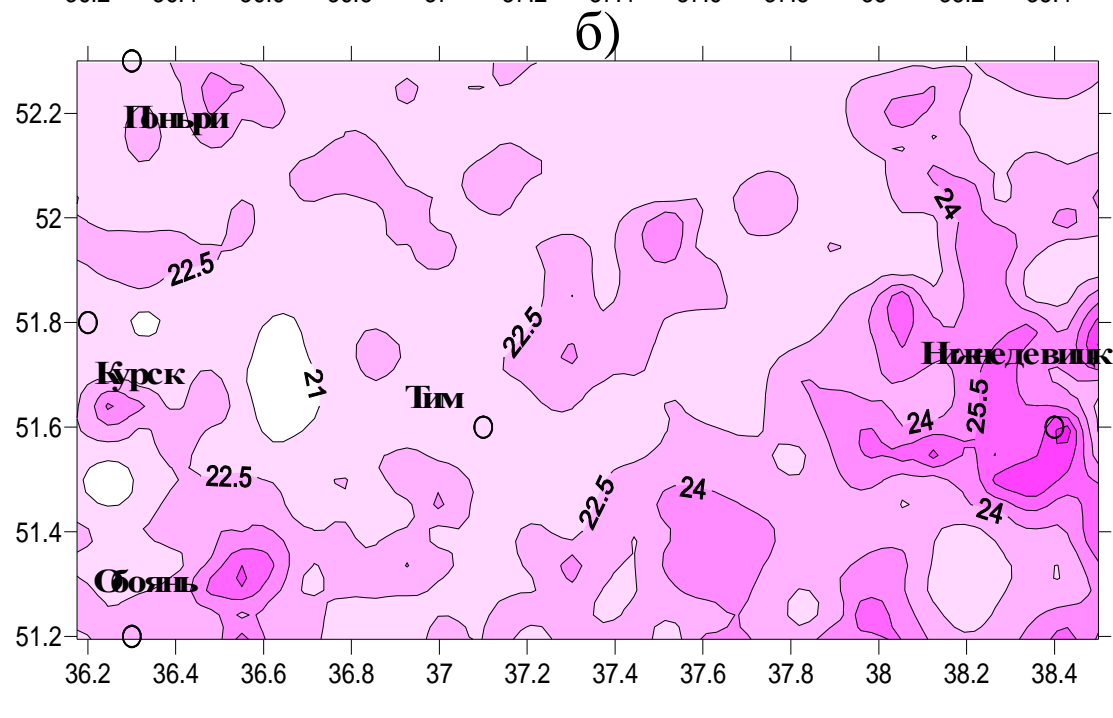
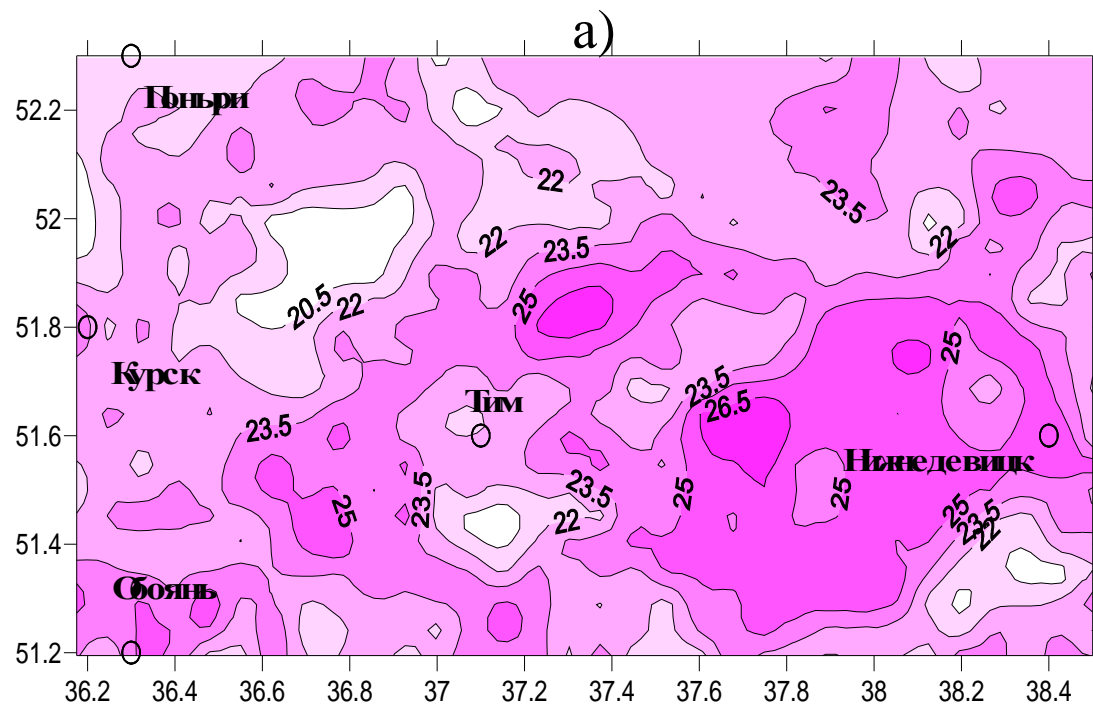
а)



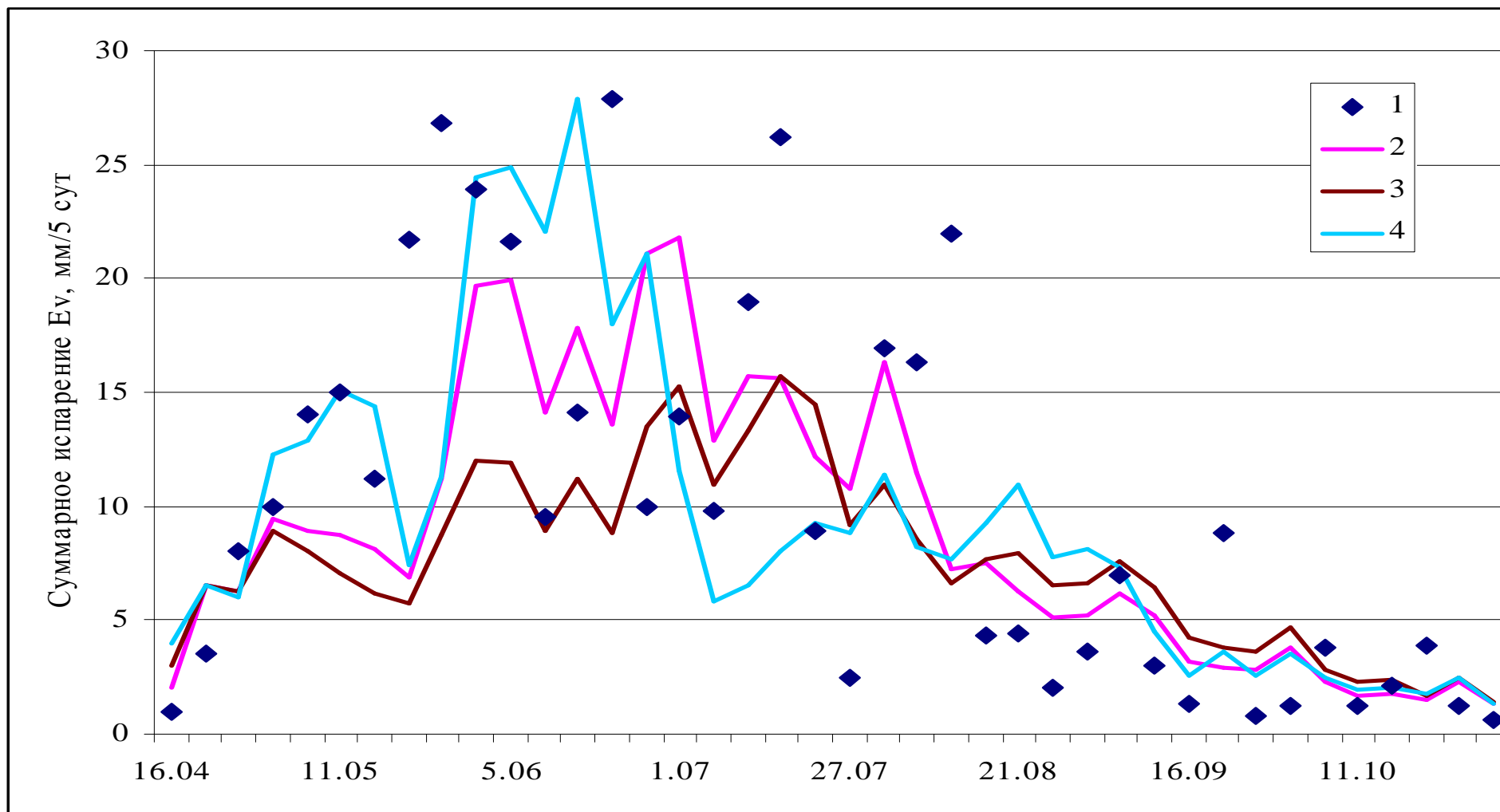
б)



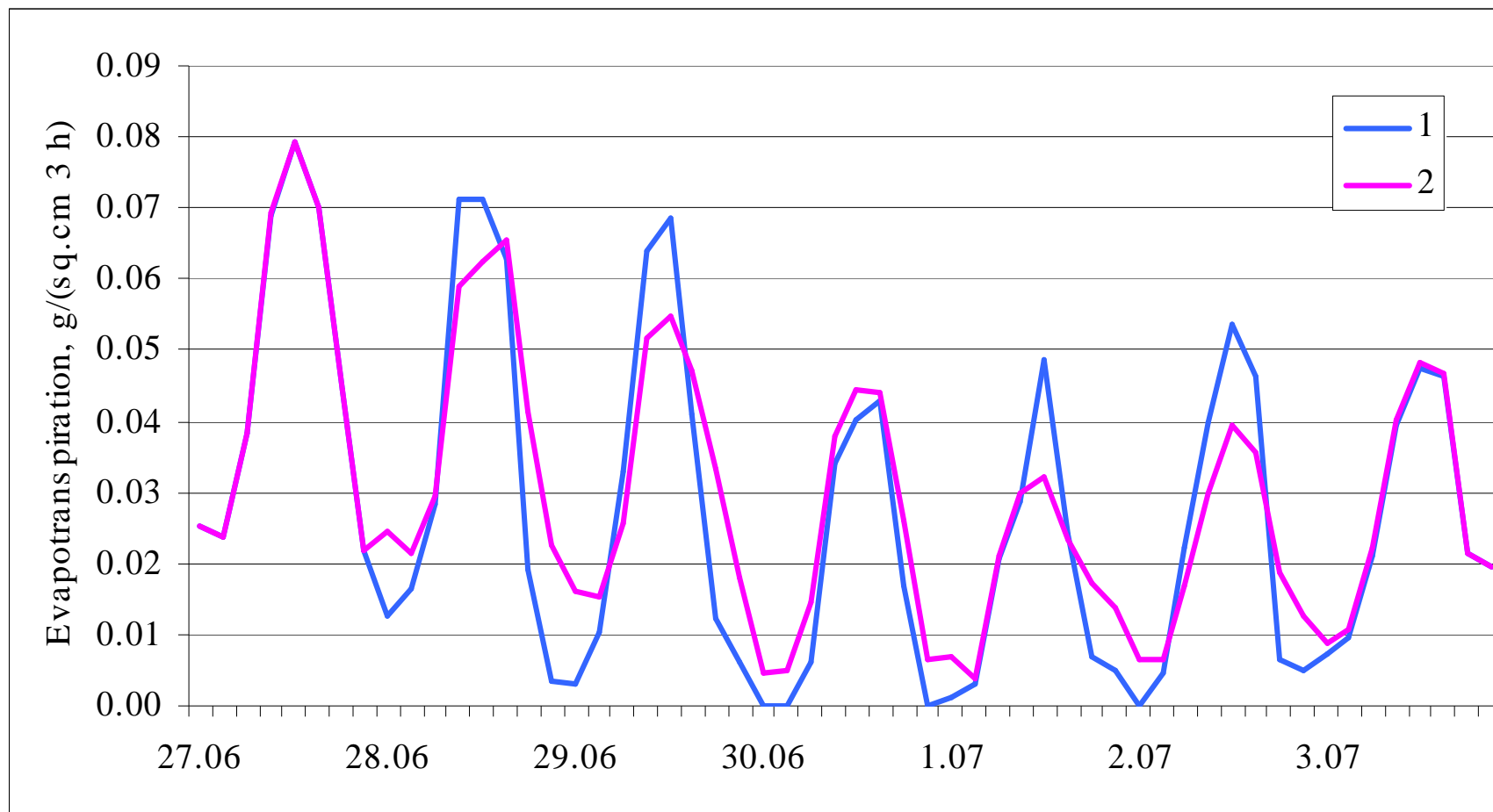
Распределения проективного покрытия растительностью В, полученного по данным AVHRR/3, для исследуемой территории площадью 15000 км² на 11 ч. 02 мая (а) и на 9 часов 01 июня (б) 2009 г. (Время местное).



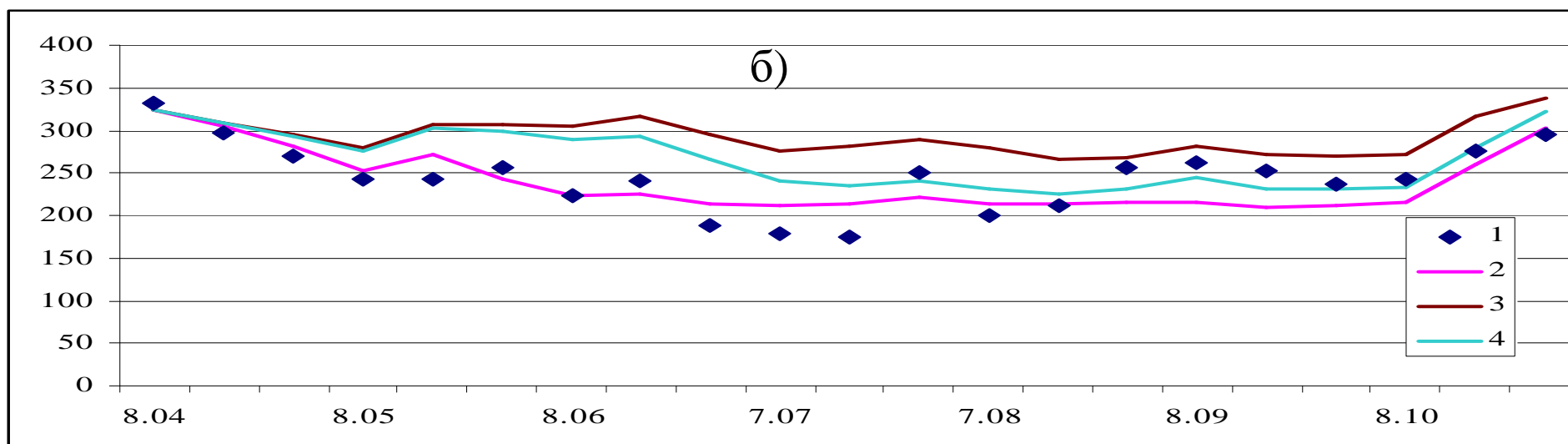
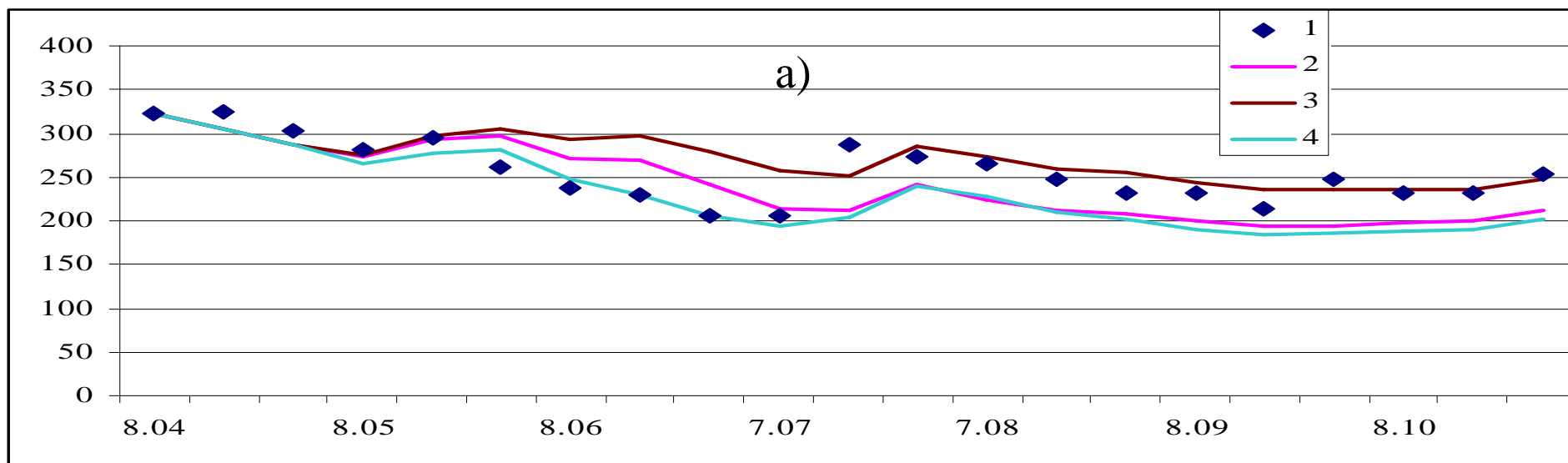
Распределения температуры подстилающей поверхности, построенные по данным AVHRR/3 для исследуемой территории площадью 15000 км², на 11 ч. 02 мая (а) и на 9 ч. 01 июня (б) 2009 г. (Время местное).



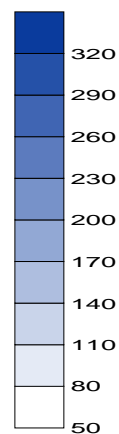
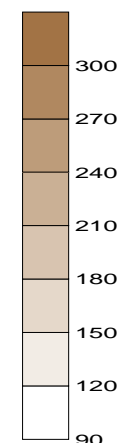
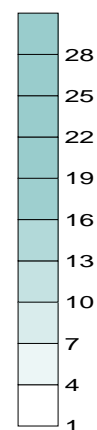
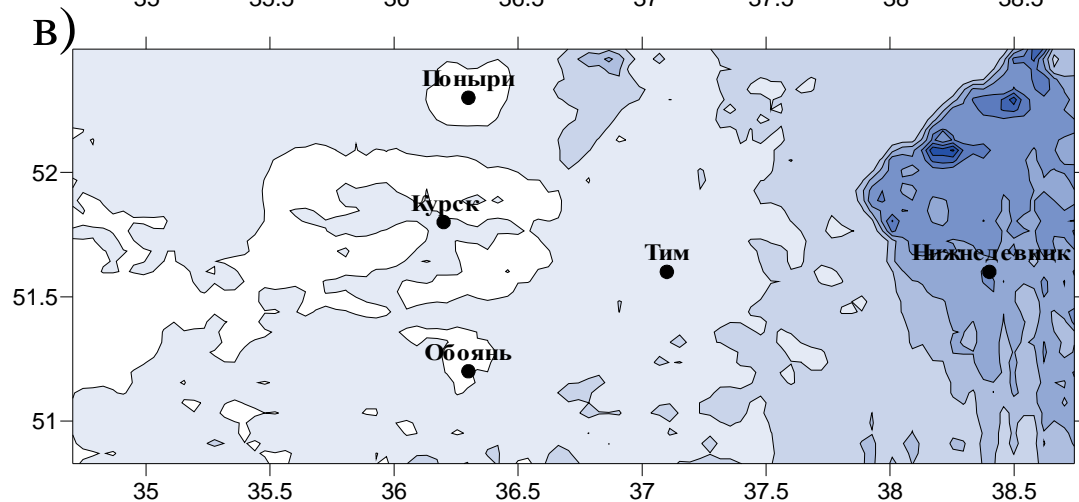
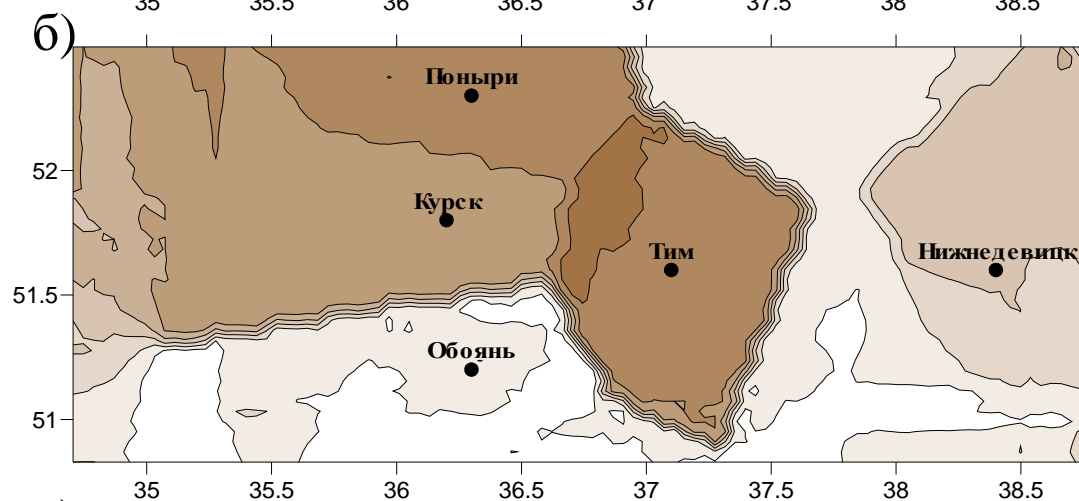
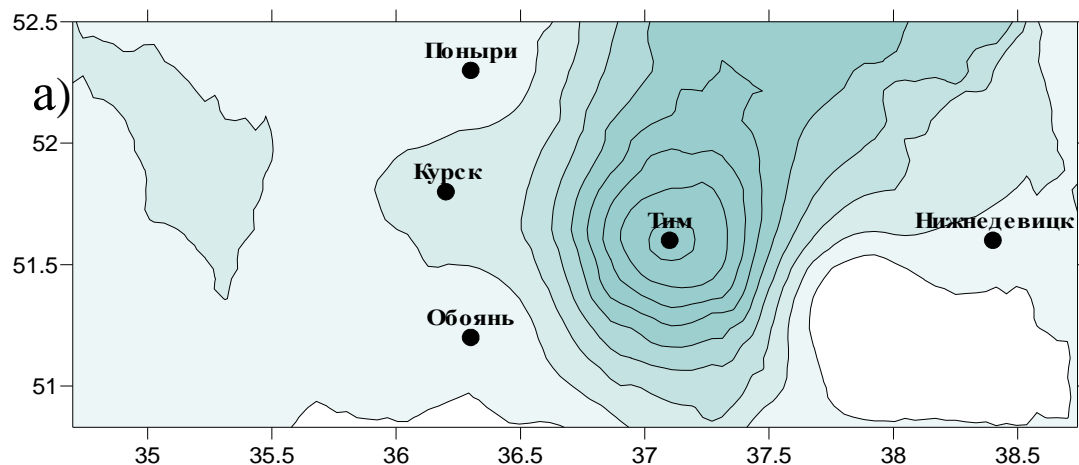
Значения суммарного испарения E_v для сезона вегетации 2009 г.: измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и многолетних трав (3) и при оценках LAI по данным MODIS (4).



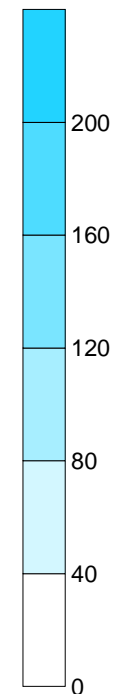
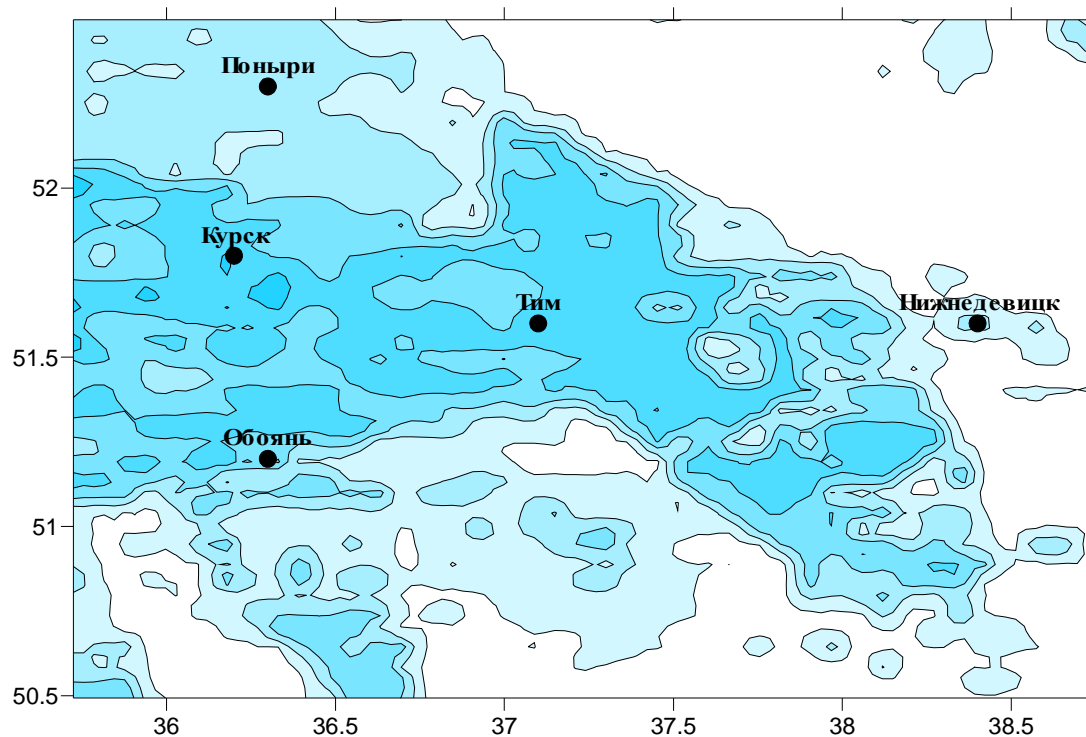
Рассчитанные по модели величины суммарного испарения за каждые три часа за период с 26.06 по 03.07. 2009 г. для агрометеостанции Курск при использовании оценок температур подстилающей поверхности, полученных по данным SEVIRI/Meteosat-9 (1) и срочным трехчасовым данным наземных наблюдений (2).



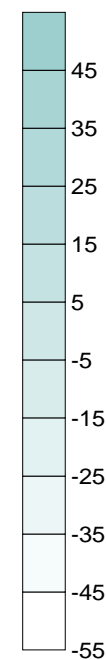
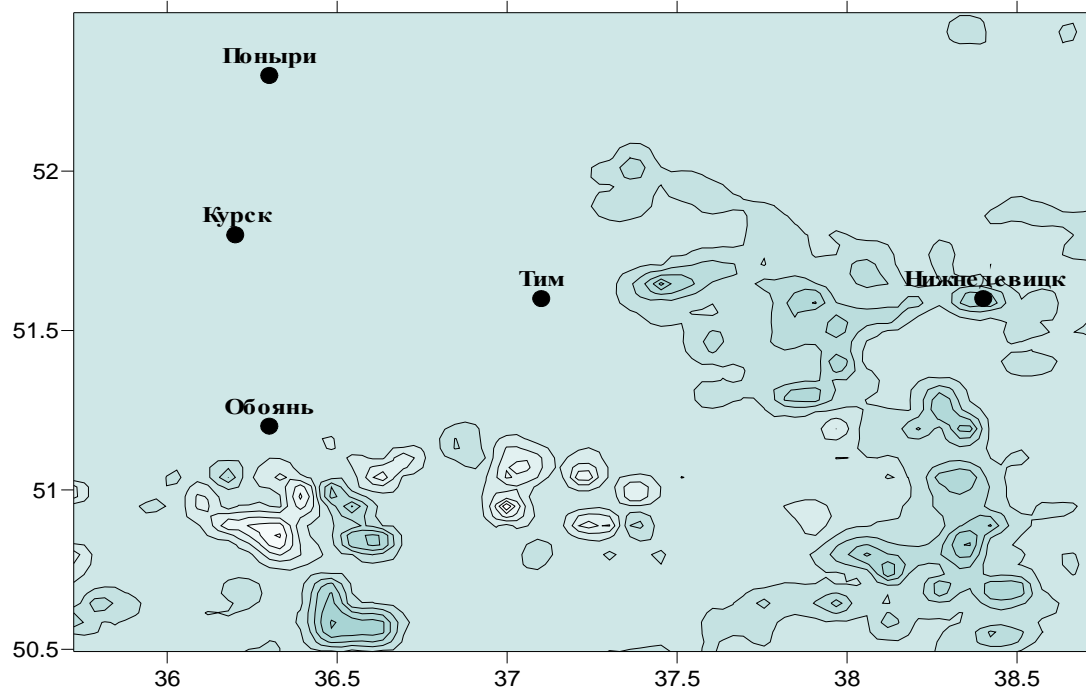
Временной ход влагозапасов почвы (в мм слоя), измеренных на агрометеостанциях Нижнедевицк (а) и Поньри (б) под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/3 для зерновых (2) и травяных (3) культур и по данным MODIS (4) для сезона вегетации 2009 г.



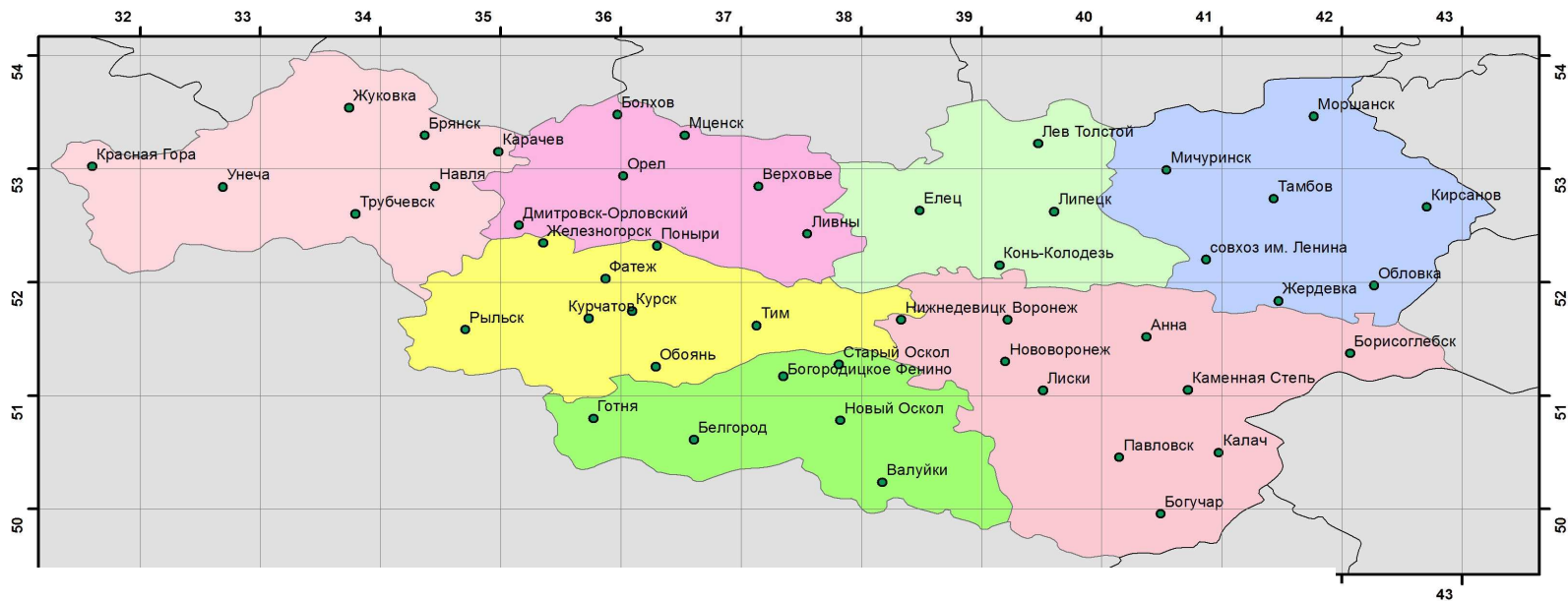
Распределения по площади исследуемой территории входных и выходных характеристик модели: осадков (мм/сут) за 25 июля 2009 г., рассчитанных по наземным данным с использованием процедуры весовой интерполяции (а); рассчитанных по модели для 27 июля 2009 г. влагосодержания почвы (мм слоя) (б) и потока скрытого тепла (кал/(см² сут)) (в).



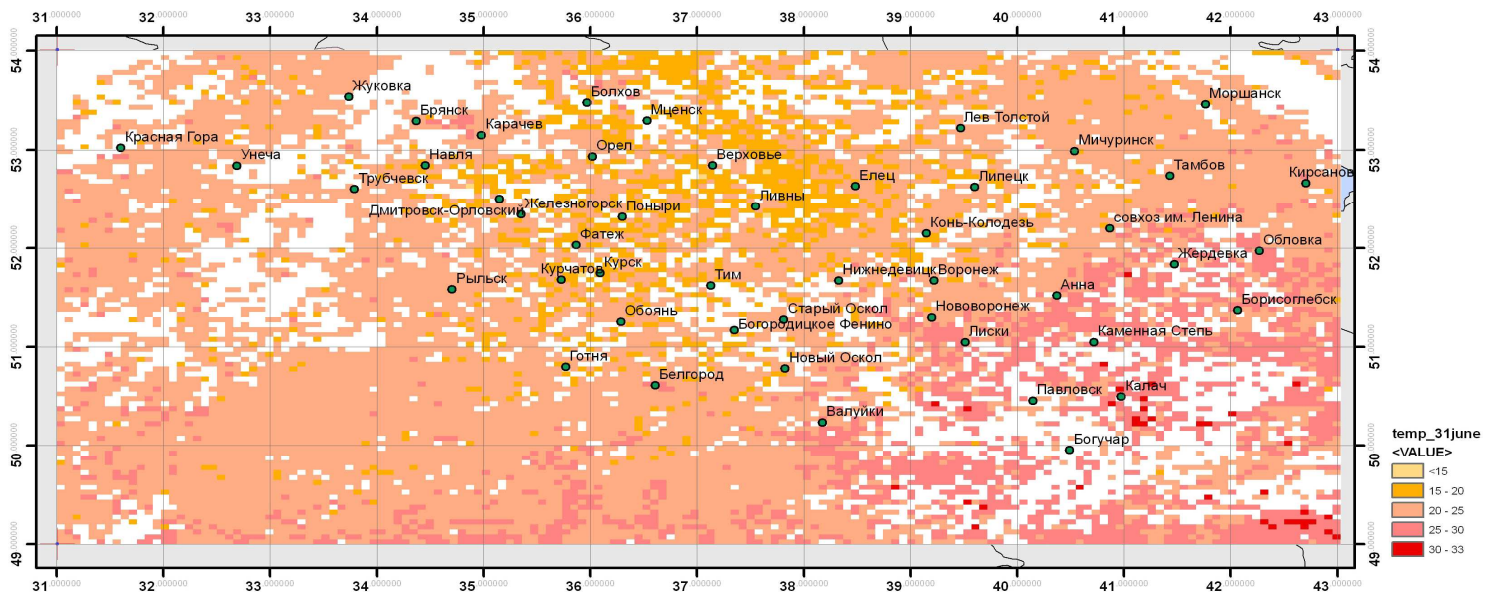
Распределения по исследуемой территории площадью 15000 км² потока скрытого тепла (кал/(см² сут)), рассчитанного по модели по наземным данным о температуре (а), и разности этого потока с рассчитанным по аналогичным данным AVHRR (б) на 14 ч. местного времени 17 августа 2009 г.



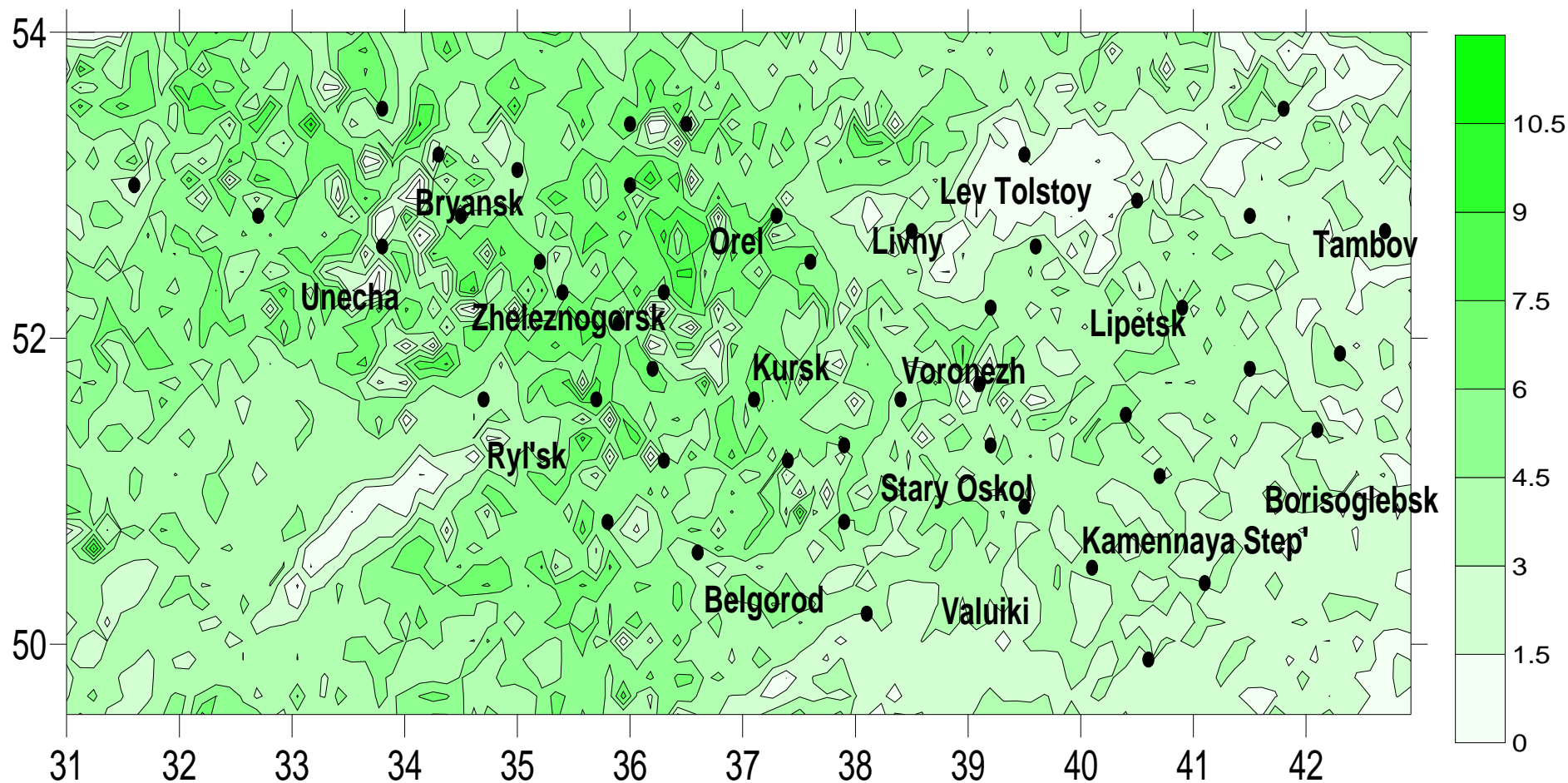
Исследуемая территория – Центрально-Черноземный регион Европейской части России площадью 227300 км²



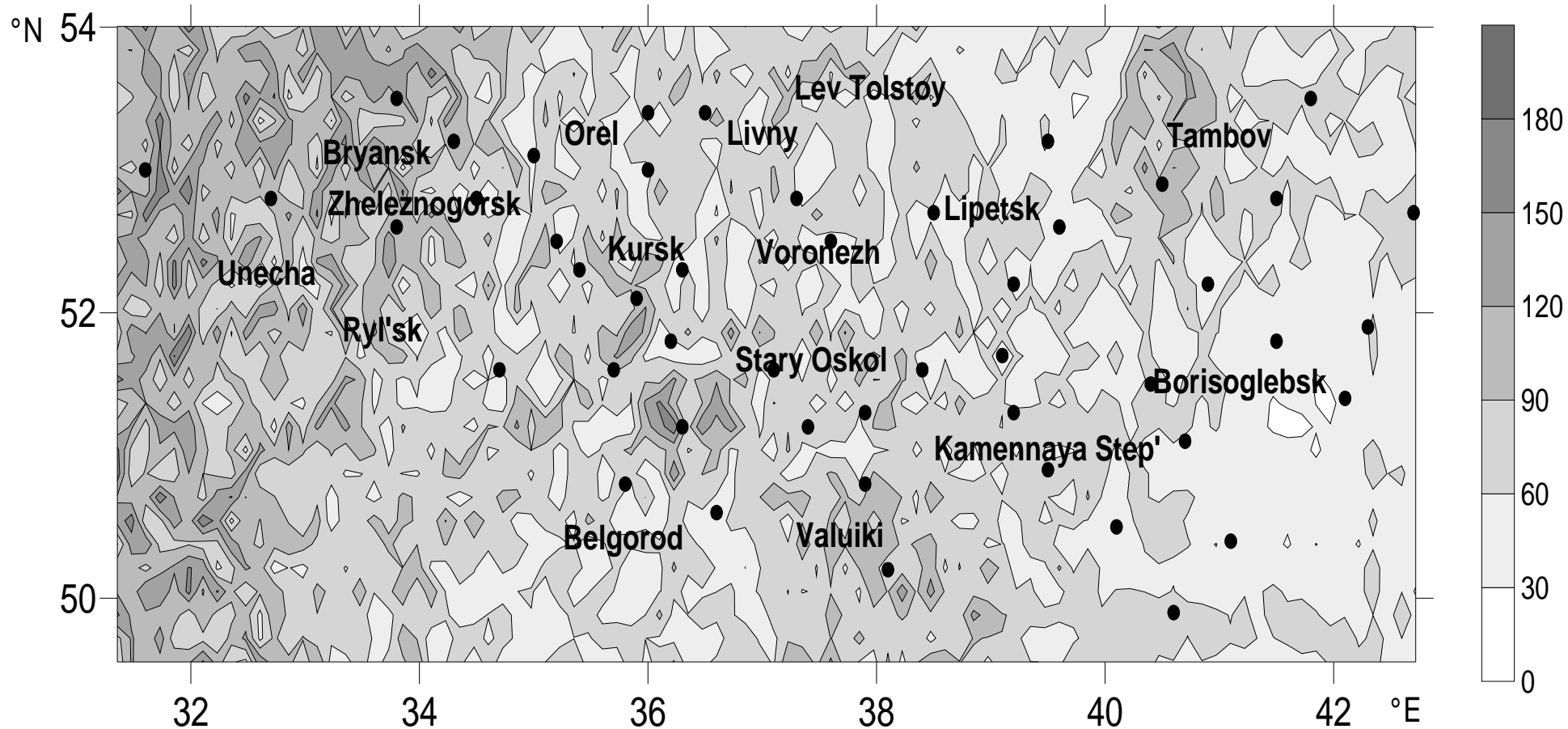
Surface temperature: 31 July 2009



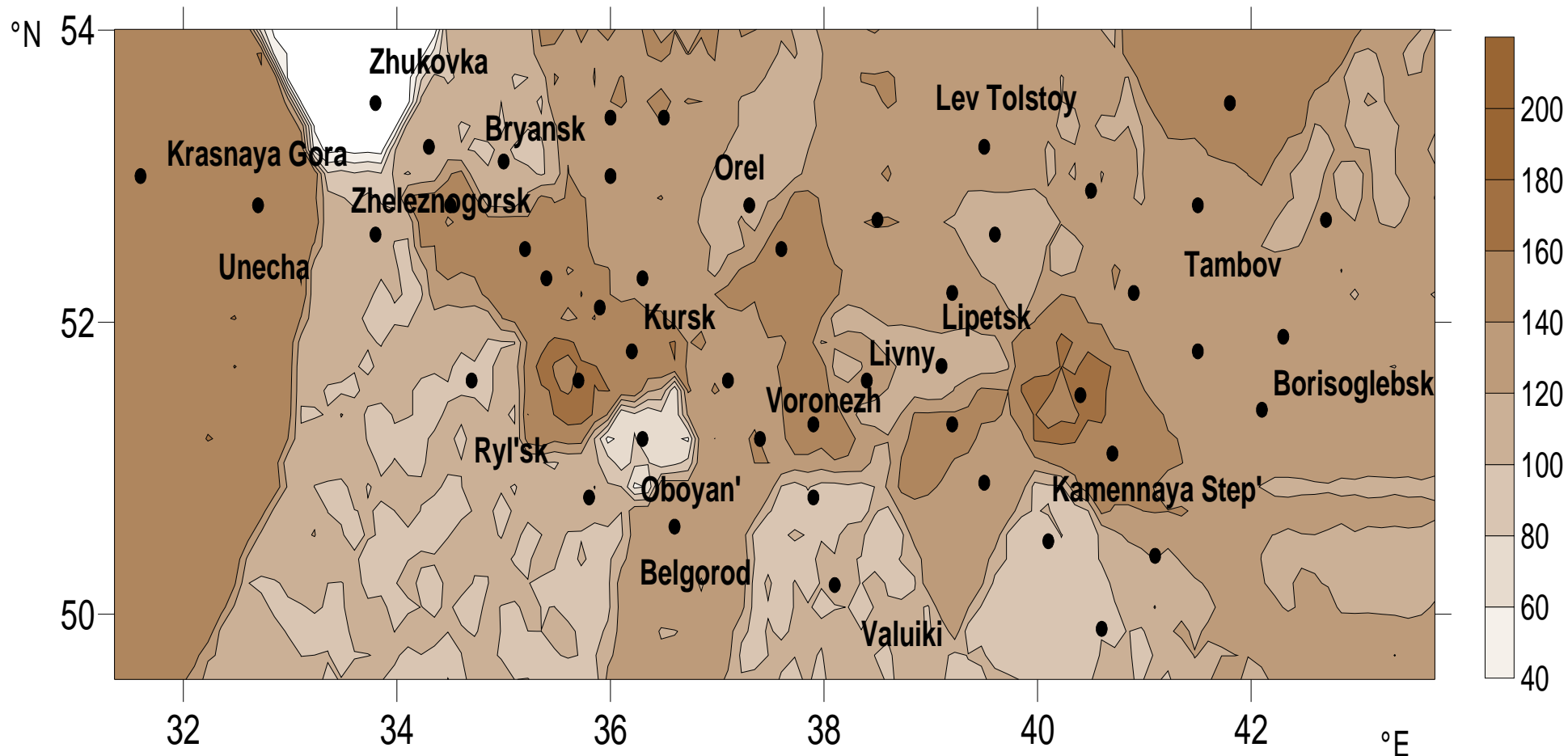
**Пространственные
распределения
спутниковых
оценок
характеристик
подстилающей
поверхности**



Распределение AVHRR- оценок LAI как параметра модели SVAT по территории Центрально-Черноземных областей ЕТР площадью 227300 км² на 12 ч. местного времени 27 мая 2009 г.



Поток скрытого тепла ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), рассчитанный по модели с использованием распределений AVHRR-оценок LAI, В и температуры подстилающей поверхности по территории Центрально-Черноземных областей ЕТР площадью 227300 км^2 на 12 ч. местного времени 27 мая 2009 г.



Влагосодержание метрового слоя почвы (мм/сут), рассчитанное по модели с использованием распределений AVHRR-оценок LAI, В и температуры подстилающей поверхности по территории Центрально-Черноземных областей ЕТР площадью 227300 км² на 12 ч. местного времени 27 мая 2009 г.

Предложенный подход, представляющий совокупность методов математического моделирования гидрологических процессов и технологий тематической обработки данных съемки с различных ИСЗ, продемонстрировал возможность построения полей значений составляющих водного и теплового балансов покрытых растительностью территорий, в том числе характеризующихся недостатком данных наземных наблюдений. Несомненные достоинства данного подхода – большой пространственный охват, высокая частота получения результатов и их приемлемая точность.

Спасибо за внимание!