

**Моделирование вертикальных потоков
влаги и тепла с поверхности речного
водосбора с использованием оценок
характеристик подстилающей
поверхности по спутниковым данным**

**Е.Л.Музылев¹, А.Б.Успенский², З.П.Старцева¹,
Е.В.Волкова², А.В.Кухарский²**

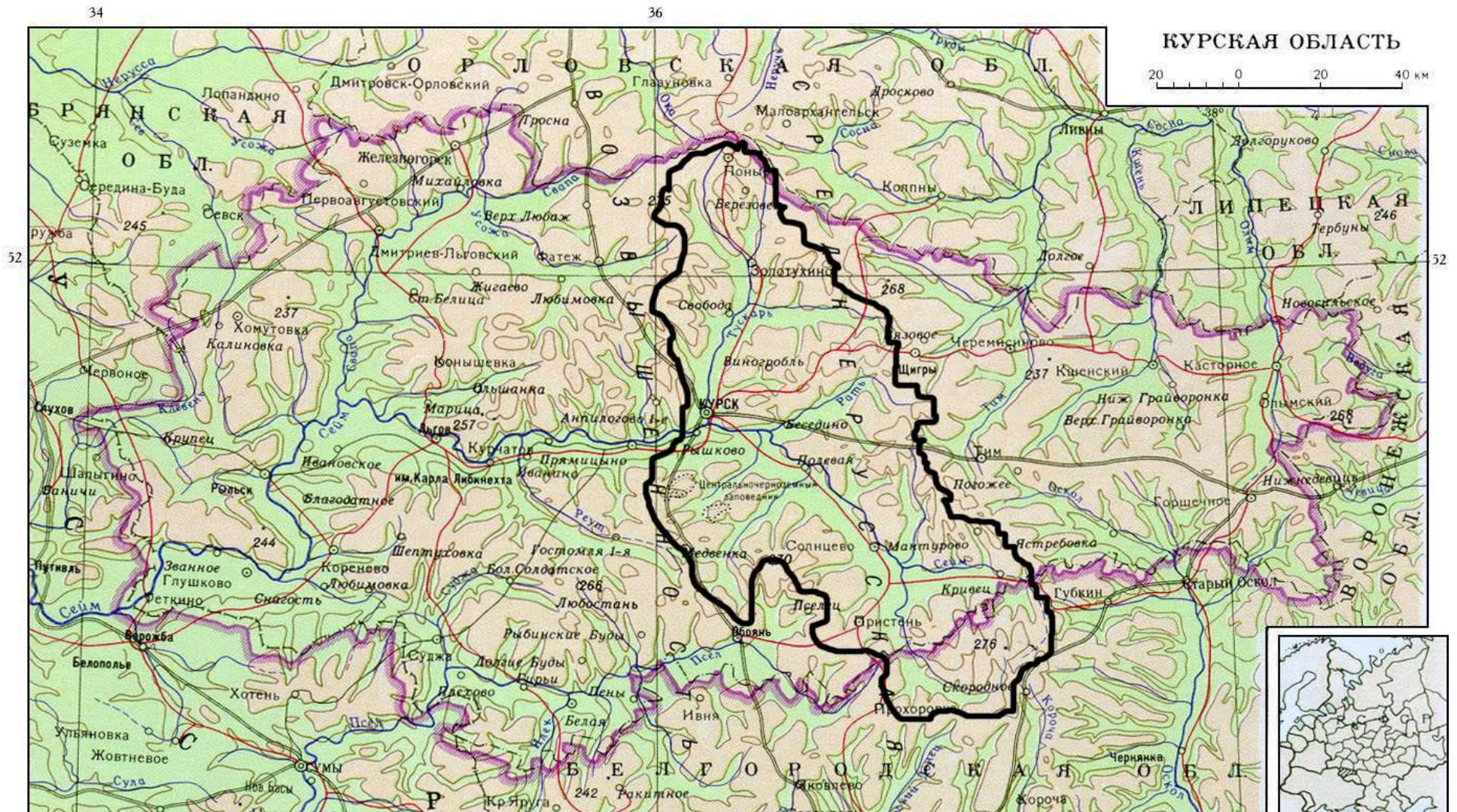
¹ Институт водных проблем РАН, г.Москва

² Научно-исследовательский центр космической
гидрометеорологии "Планета" Росгидромета,
г.Москва

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 измерениям радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra и Aqua, анализ достоверности этих оценок;
- разработка способов использования спутниковых оценок характеристик растительности в качестве параметров модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT), а температуры подстилающей поверхности – в качестве ее входной переменной, в том числе создание и отладка процедур учета в модели пространственной неоднородности названных характеристик;
- получение с помощью адаптированной к спутниковым данным модели SVAT оценок составляющих водного и теплового балансов для территории Курской модельной области, включающей водосбор р.Сейм.

Исследования проводились на примере Курской модельной области, включающей водосбор р.Сейм площадью 7460 км², для сезонов вегетации 1999-2008 гг.



Краткое описание модели SVAT

Суммарное испарение представляется суммой двух потоков - испарения с голой почвы, E_g , и транспирации растительности, E_f

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

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

Относительная влажность воздуха на границе почва – атмосфера

$$r = \exp\left(\frac{M_g \psi(\theta)}{R_w (T_g + 273)}\right)$$

Уравнение влагопереноса в почве:

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

Гидравлическая проводимость почвы

Отсос почвенной влаги корнями растений

$$K(\theta) = K_0 \cdot \left(\frac{\theta - \text{МН}}{P - \text{МН}} \right)^n$$

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

Водный потенциал листвы

$$\psi_f = \psi_r - r_r E_f \quad E_f = \rho_w \int_0^{z_{\max}} S_r(\theta, z) dz$$

Водный потенциал почвы

$$\Psi(\theta) = \Psi(\text{WP}) \left(\frac{\text{WP} - \text{MH}}{\theta - \text{MH}} \right)^m$$

$$m = \frac{\log \frac{\Psi(\text{WP})}{\Psi(\text{MH}) \cdot \frac{\text{MH}}{P}}}{\log \left(\frac{P - \text{MH}}{\text{WP} - \text{MH}} \right)}$$

Коэффициент диффузии

$$D(\theta) = K_0 \cdot \Psi(\text{WP}) \cdot \frac{m}{\theta - \text{MH}} \left(\frac{\theta - \text{MH}}{P - \text{MH}} \right)^n \cdot \left(\frac{\text{WP} - \text{MH}}{\theta - \text{MH}} \right)^m$$

Устьичное сопротивление

Аэродинамическое сопротивление

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

$$r_a = 1 / (C_e U) \quad U - \text{ скорость ветра}$$

Турбулентные потоки явного тепла для почвы H_g и растительности H_f

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

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

Уравнение теплового баланса для растительного покрова

$$R_{sf} + R_{lf} = LE_f - H_f$$

Уравнение теплового баланса для верхнего слоя почвы

$$G = R_{sg} + R_{lg} - LE_g - H_g$$

Уравнение теплопроводности для почвы

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

Нижнее граничное
условие

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T_m - T_z)$$

Уравнение для длинноволновой части радиационного баланса

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

T_s - радиационная температура подстилающей поверхности

R_a - противоизлучение атмосферы

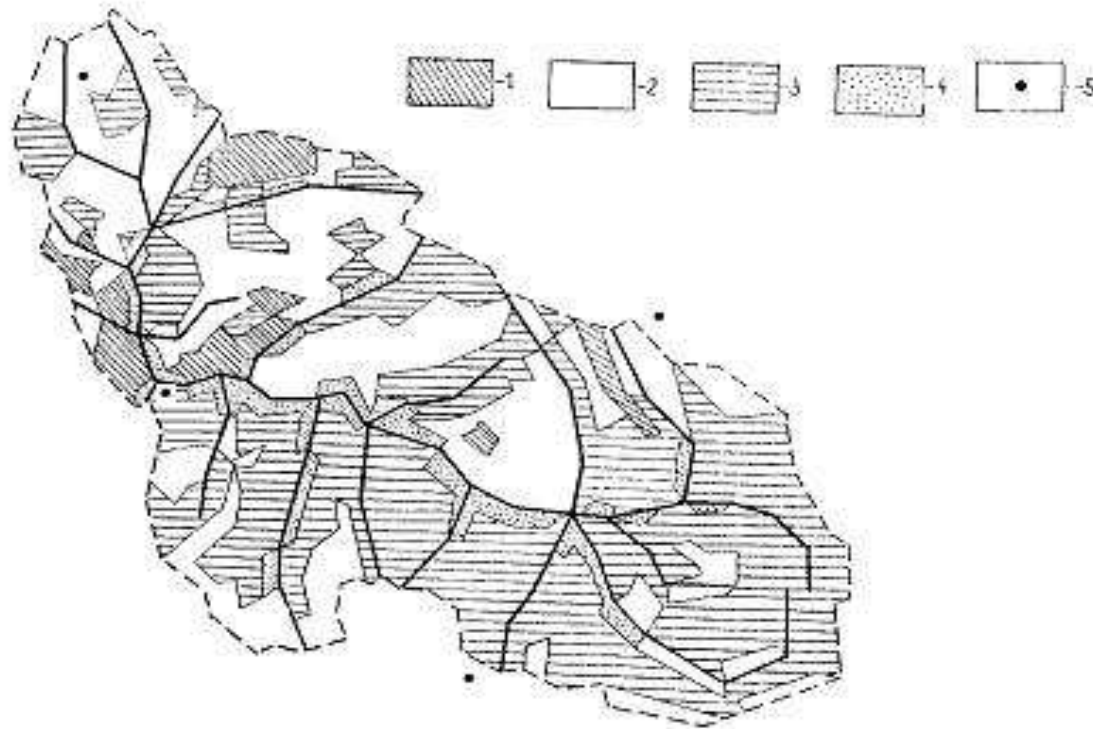
$$R_a = \left[N_{cl} + (1 - N_{cl})k_2 q_a^{0.08} \right] \sigma T_a^4$$

N_{cl} - общая облачность
в долях единицы

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

Пространственная неоднородность подстилающей поверхности учитывается в модели при расчетах по данным наземных наблюдений путем деления площади водосбора на несколько больших участков, каждый из которых прилегает к одной из агрометеостанций, данные метеонаблюдений на которой распространяются на весь этот участок, с последующим делением каждого из участков на более мелкие, однородные по типам почв, типам землепользования и видам растительности. При такой схематизации для каждого элементарного участка задаются значения почвенно-гидрологических характеристик, в том числе коэффициента фильтрации, объемного веса, пористости, максимальной гигроскопичности, наименьшей полевой влагоемкости, а также характеристик растительности – минимального устьичного сопротивления, листового индекса LAI, коэффициента шероховатости (зависящего от высоты растений). Значения суммарного испарения, влаго- и теплосодержания почвы, потоков скрытого и явного тепла и других составляющих водного и теплового балансов для всего водосбора вычисляются как средневзвешенные с учетом размеров площадей, занятых каждым видом растительности для каждого из типов почв.

Распределение основных типов почв по территории водосбора р.Сейм.



Типы почв (1- 4):

1 – серозёмы; 2 – подзолистые чернозёмы; 3 – типичные чернозёмы; 4 – пойменно-луговые почвы.

5 - агрометеорологические станции.

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

Оценка температуры поверхности почвы по данным AVHRR

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

ε_4 и ε_5 – оценки излучательной способности для 4-го и 5-го каналов радиометра AVHRR, полученные с привлечением априорных моделей ε , разработанных для 31-го и 32-го каналов радиометра 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

Эффективная радиационная температура подстилающей поверхности

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

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

$$T_{s,eff} = BT_a + (1-B)T_{sg}$$

Проективное покрытие растительностью

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

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

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 радиометра AVHRR

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

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

$$B = 1 - \exp(-p LAI)$$

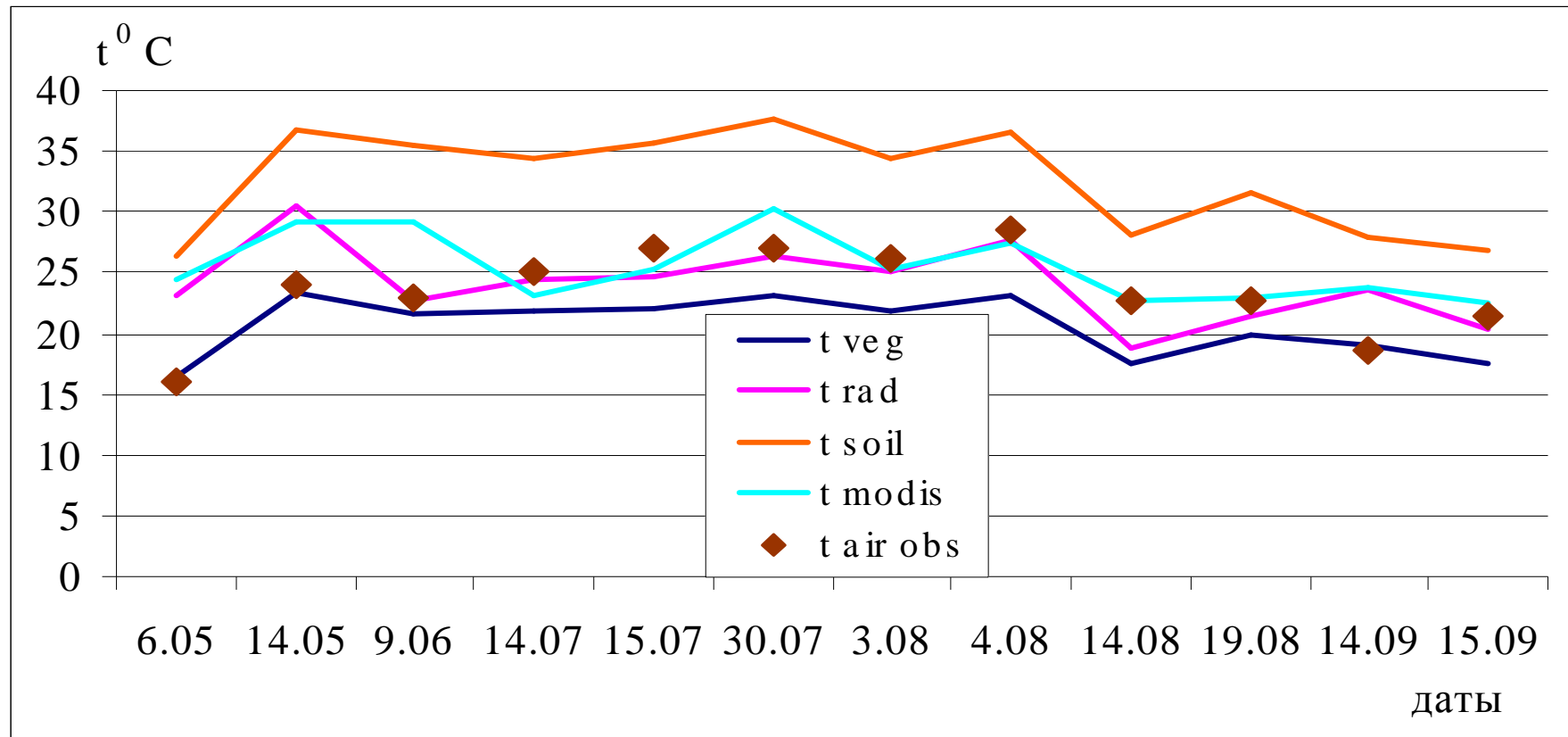
Для разработки методов анализа спутниковых данных был создан архив синхронных спутниковых и наземных наблюдений за периоды вегетации 1999-2008 гг., который содержал данные измерений радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-14, -16, -17, -18 с разрешением 1' по широте и 1,5' по долготе для территории, включавшей водосбор р.Сейм, и материалы синоптических наблюдений за температурой воздуха и поверхности почвы для шести находящихся на водосборе и вблизи его границ агрометеостанций. Оценки NDVI, ϵ , B, T_a , T_g , $T_{s,eff}$ выполнялись для фрагментов изображения размером 3x3 пиксела, соответствовавших ячейке сетки модели SVAT площадью $\approx 5 \times 7$ км². Рассматривались только те случаи, когда количество безоблачных пикселов в пределах выбранных фрагментов составляло не менее двух. Количество дней, полностью или частично безоблачных в течение сезона вегетации, для данного региона достаточно велико, поэтому массивы использованных спутниковых данных для каждого из сезонов содержали по несколько десятков изображений. Для оценки точности дистанционного определения по данным AVHRR величин T_a , T_{sg} , $T_{s,eff}$ использовалась выборка пространственно совмещенных и ближайших по времени спутниковых и наземных измерений.

Таблица 1. Оценки характеристик подстилающей поверхности по данным AVHRR и статистика ошибок определения T_a , $T_{s.eff}$ и T_{sg} для сезона вегетации 2004 г.

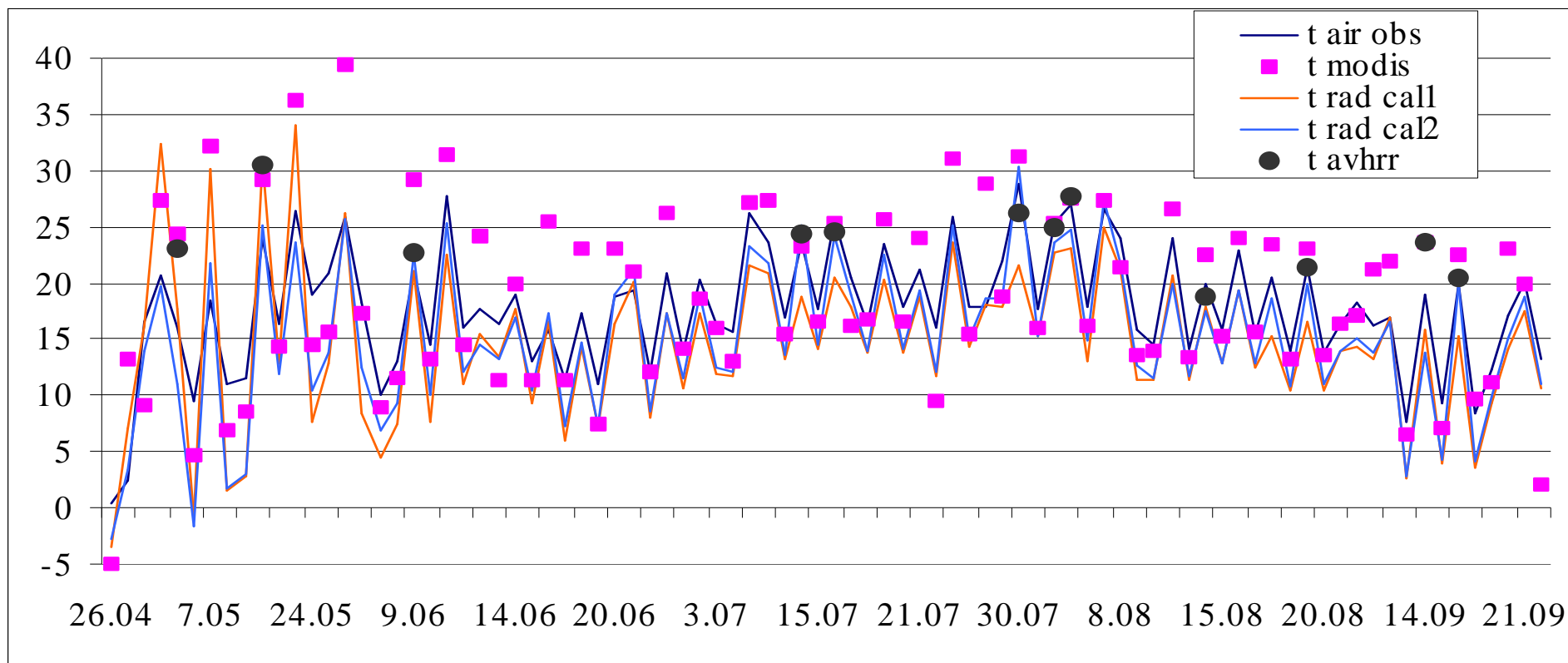
Агрометеостанция	N	NDVI	B	T_a			$T_{s.eff}$			T_{sg}		
				Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто
Курск	64	0,386	0,57	-0,96	2,41	2,21	-0,98	2,96	2,80	-0,73	4,51	4,45
Обоянь	61	0,349	0,50	-1,31	2,83	2,51	-1,42	3,64	3,35	-1,38	4,79	4,59
Поныри	51	0,343	0,49	0,44	2,53	2,50	0,63	3,38	3,32	0,41	4,91	4,89
Тим	55	0,358	0,52	0,90	2,39	2,21	0,77	2,40	2,28	0,91	3,46	3,34
Каменная Степь	51	0,324	0,45	1,19	2,53	2,23	1,30	3,02	2,73	1,50	3,98	3,69
Нижнеде- вицк	52	0,358	0,52	0,23	2,50	2,49	0,31	2,84	2,82	0,67	3,70	3,63
Среднее		0,353	0,51	0,08	2,53	2,36	0,10	3,04	2,88	0,23	4,23	4,10

Средние квадратические отклонения (ско) 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) отмечались в жаркий период лета (конец июня - июль), что, по-видимому, вызвано существенным (до +50-60°C) локальным перегревом поверхности почвы, разницей до полутора часов между спутниковыми и наземными наблюдениями и генерализацией спутниковых данных.

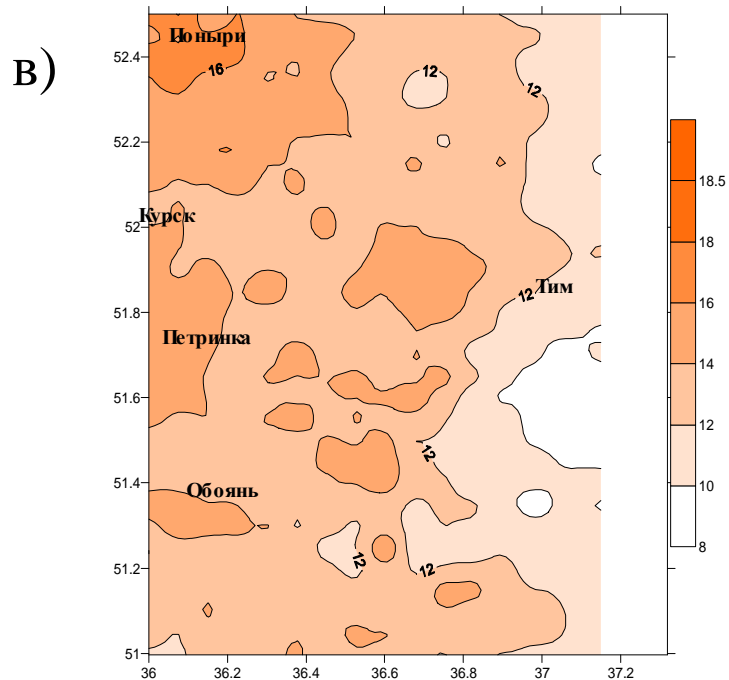
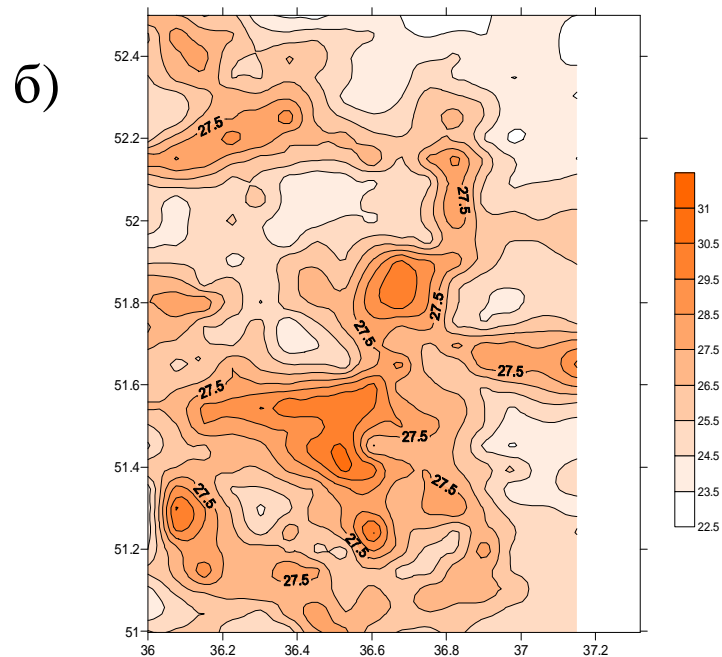
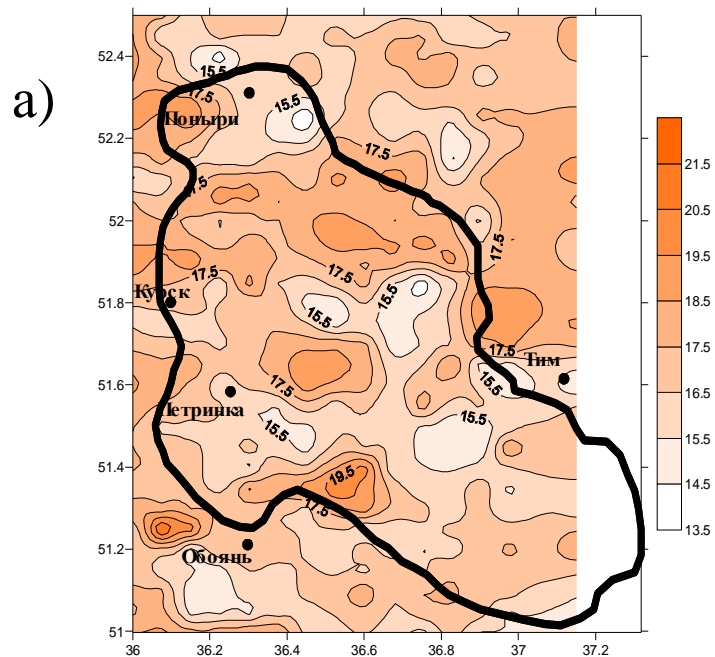
Файлы с оценками по данным MODIS/Terra и Aqua величин $T_{s,eff}$, NDVI, LAI и излучательной способности E подстилающей поверхности для области (гранулы), в которую входит территория водосбора р.Сейм, были получены при использовании ресурсов Интернет. Для $T_{s,eff}$ были загружены два вида оценок: продукты (MOD11B1) на квазирегулярной сетке (разрешение ~ 4.8 км) и продукты (MOD11_L2) с разрешением ~ 1 км. Пространственное разрешение оценок NDVI и LAI составляет 1 км, причем оценки NDVI и LAI получают за временной период в 8 дней. Далее с помощью специально созданного программного обеспечения были выполнены форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов спутникового зондирования. Достоверность оценок $T_{s,eff}$ (MOD11B1 и MOD11_L2) проверялась путем их сопоставления с данными квазисинхронных пространственно совмещенных наземных агрометеорологических наблюдений, а также с аналогичными оценками за отдельные сроки тех же периодов вегетации по данным AVHRR/3. Согласно результатам сопоставлений оценки $T_{s,eff}$ (MOD11B1) для большинства сроков более достоверны, чем оценки $T_{s,eff}$ (MOD11_L2). Значения максимальной абсолютной разности оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) и $T_{s,eff}$ (AVHRR/3) лежат в диапазоне 2.0-3.0°C, а среднеквадратическое отклонение оценок $T_{s,eff}$ (MODIS) от значений температур, измеренных на агрометеостанциях, не превышает 3.5°C.



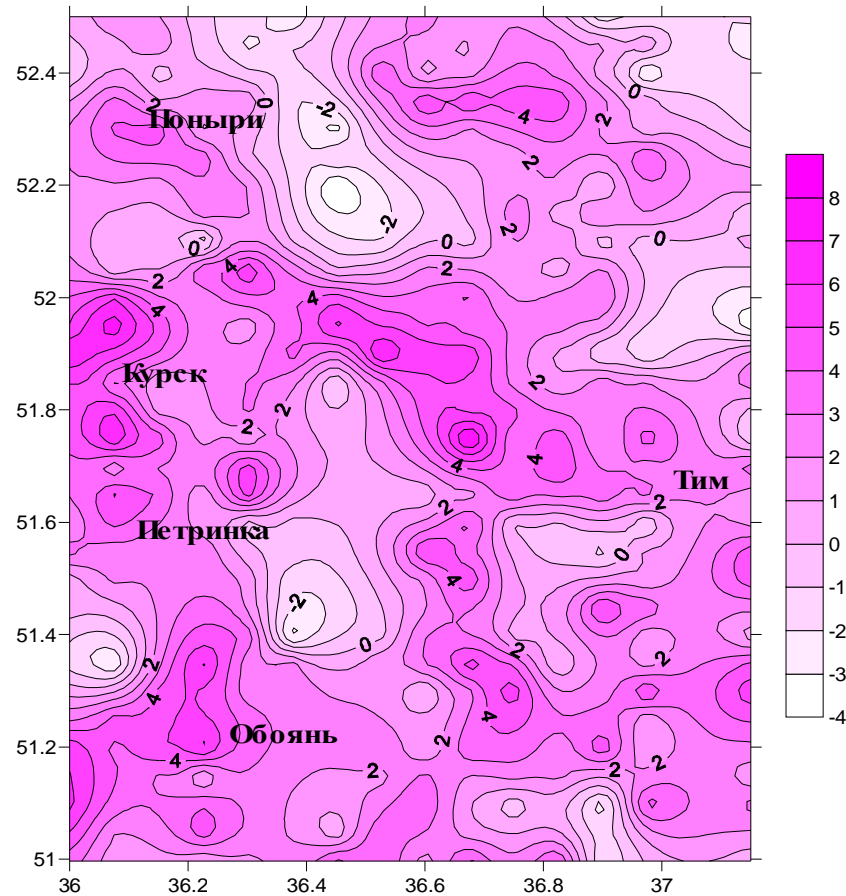
Значения температур поверхности растительного покрова T_{veg} , поверхности почвы T_{soil} , радиационной температуры подстилающей поверхности T_{rad} , определенных по данным AVHRR/NOAA и аналогичной радиационной температуры, определенной по данным MODIS/Terra T_{modis} . $T_{air\ obs}$ – наблюдаемая температура воздуха. Агростанция Нижнедевицк, участок с многолетними травами, 2003 г.



Значения радиационной температуры подстилающей поверхности, определенной по данным AVHRR/NOAA, T_{avhrr} , и MODIS/Terra, T_{modis} и рассчитанной по модели при использовании значений LAI и В, определенных по наземным и спутниковым данным, $T_{rad\ call}$ и $T_{rad\ cal2}$. $T_{air\ obs}$ – наблюдаемая температура воздуха для участка с многолетними травами. Агрометеостанция Нижнедевицк, 2003 г.

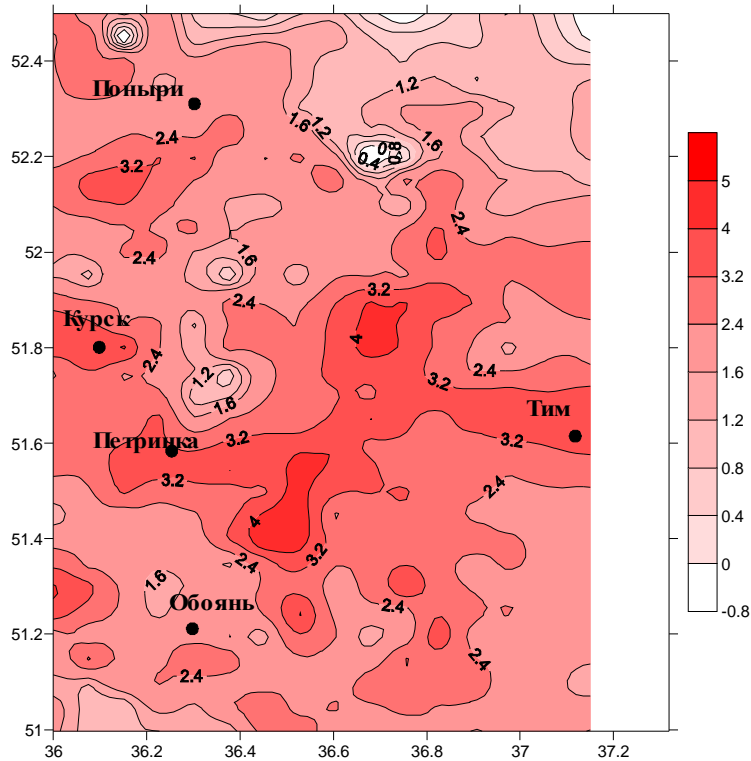


Распределения температуры подстилающей поверхности, полученной по данным AVHRR/3, для территории, включающей водосбор р.Сейм, на 21 апреля (а), 6 июня (б), 24 сентября (в) 2008 г., 14 ч. местного времени

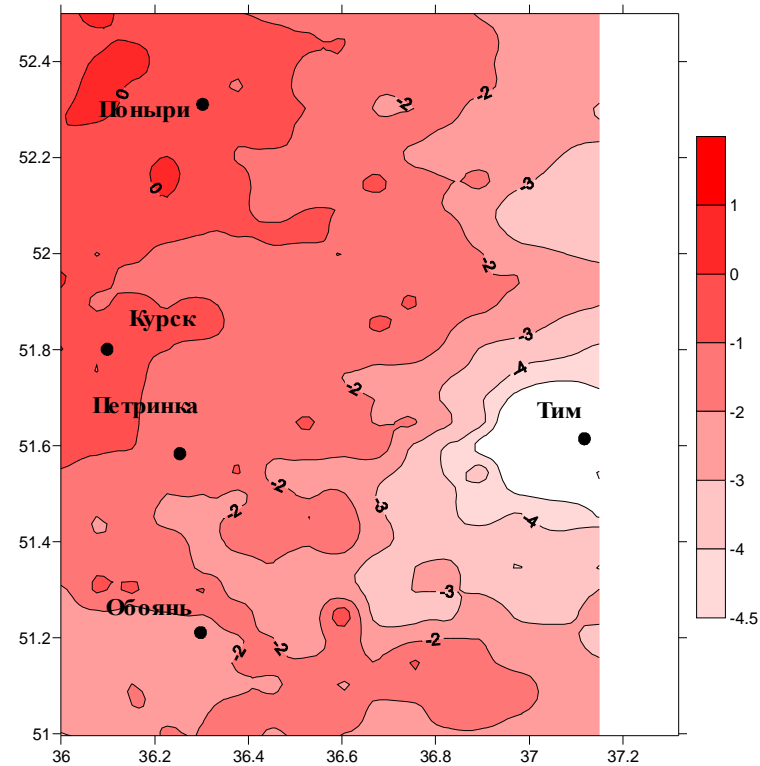


Разности значений температур подстилающей поверхности $T(\text{MODIS}) - T(\text{AVHRR})$ для территории Курской модельной области на 14 ч. местного времени 6 июня 2008 г.

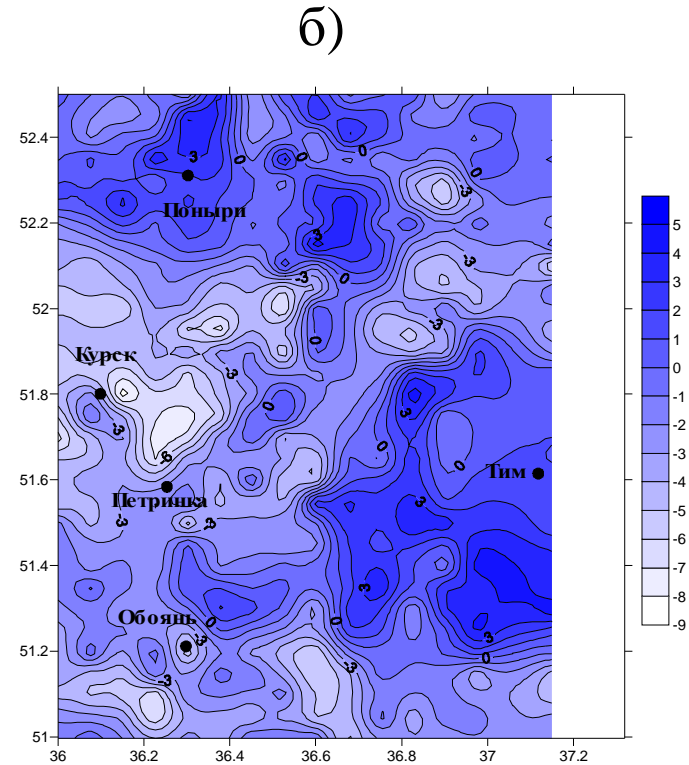
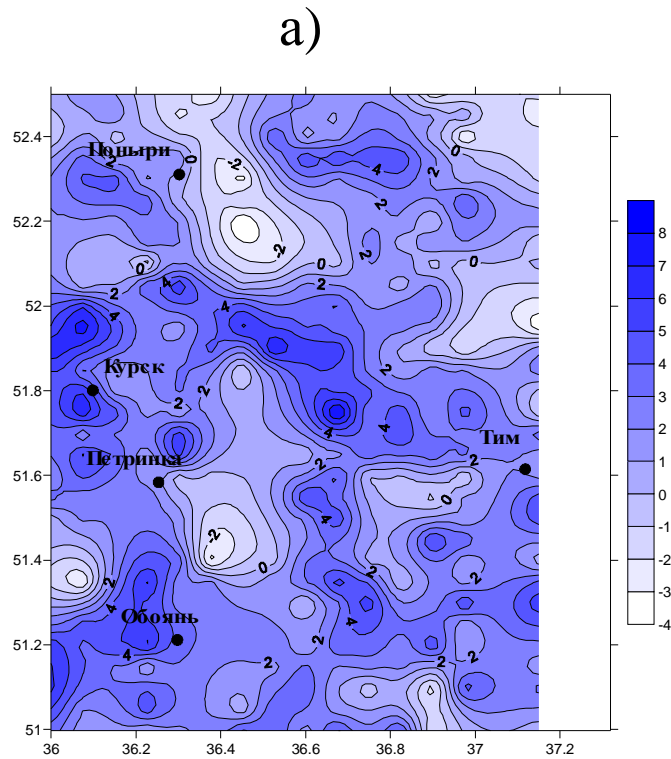
а)



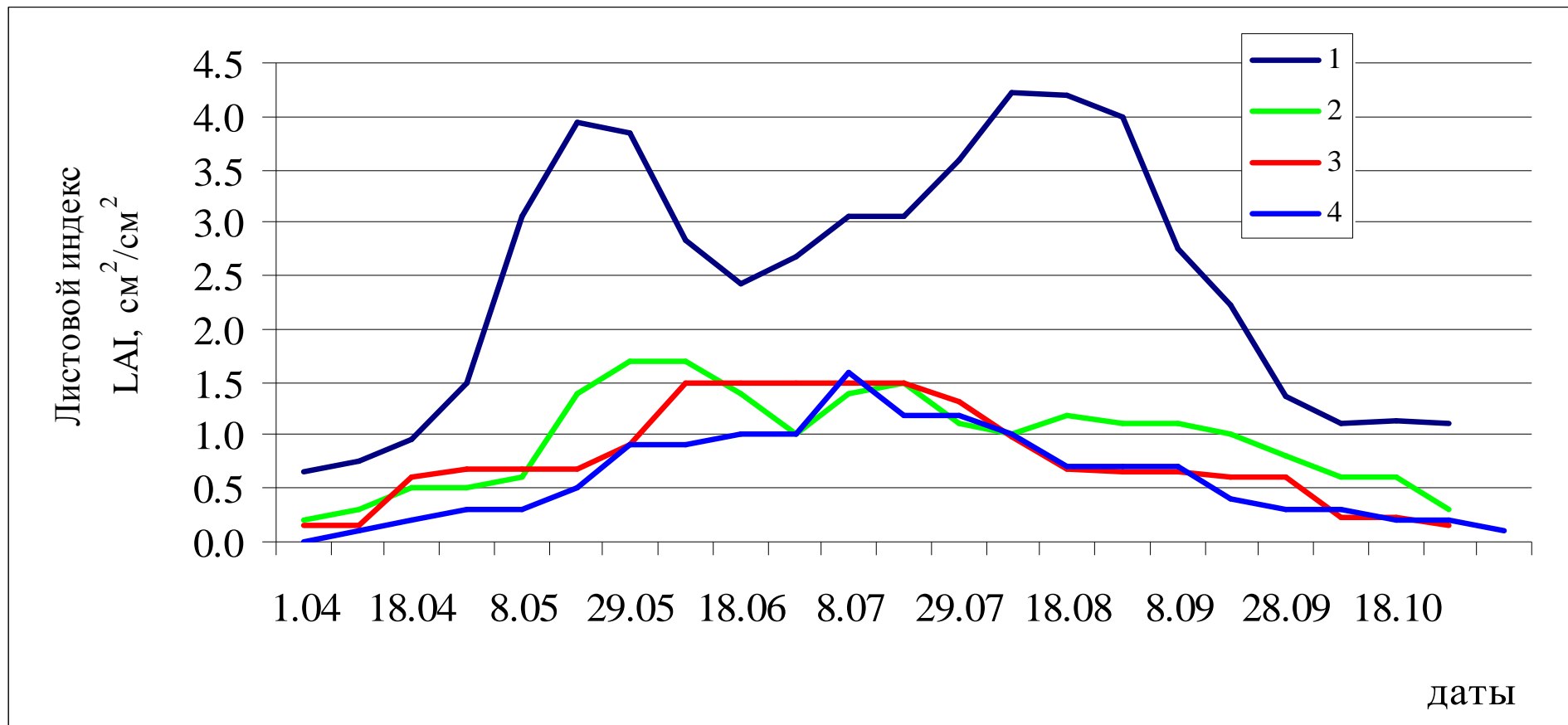
б)



Распределение разности температур подстилающей поверхности $\Delta T = T_{s.\text{eff}}(\text{AVHRR}) - T_s(\text{MODEL})$ для территории, включающей водосбор р.Сейм, с пространственным разрешением ~ 5 км для 6 июня (а) и 24 сентября (б) 2008 г.

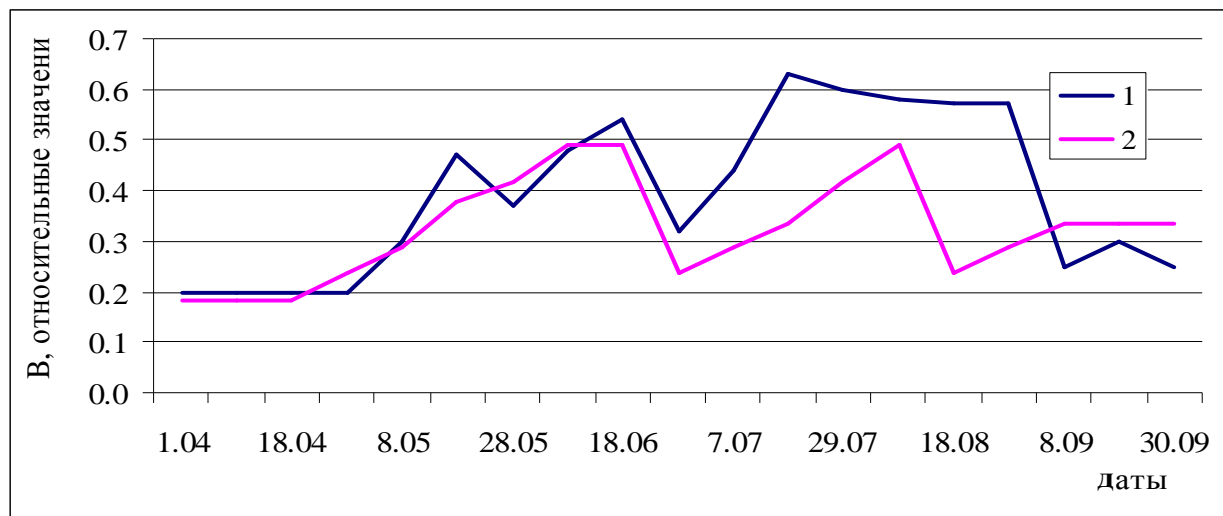


Распределение разности температур подстилающей поверхности $\Delta T = T_{s,eff}(\text{MODIS}) - T_s(\text{MODEL})$ для территории, включающей водосбор р.Сейм, с пространственным разрешением ~ 5 км для 6 июня (а) и 5 сентября (б) 2008 г.

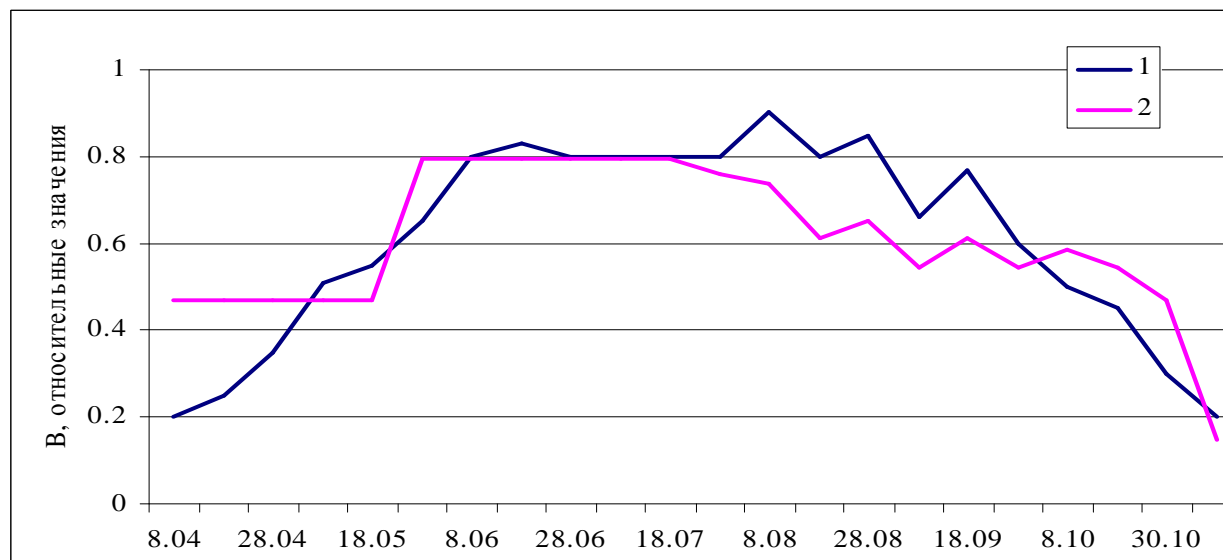


Временные ходы листового индекса LAI для сезона вегетации 2004 г., определённые по данным AVHRR/3 (1, 2), MODIS (4) и по данным наземных наблюдений (3) на воднобалансовой станции Нижнедевицк для зерновых (1) и травяных (2, 3) культур и без выделения культур (4).

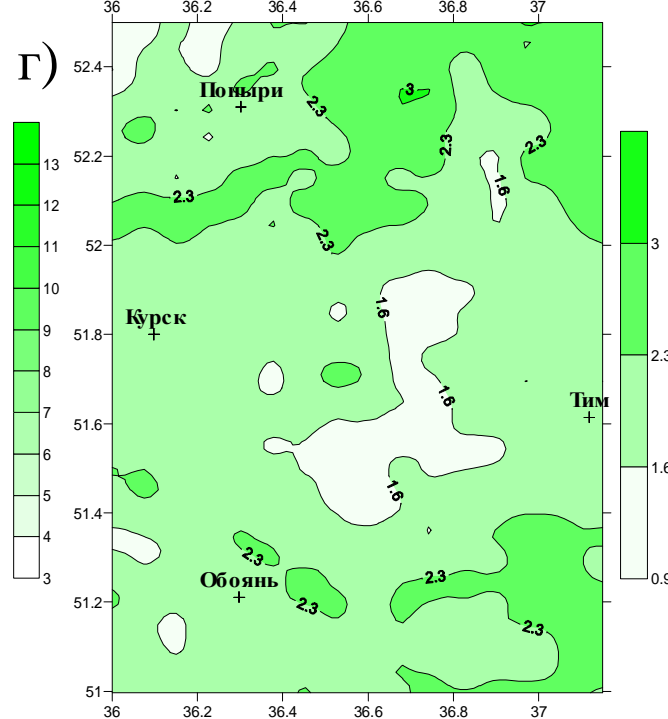
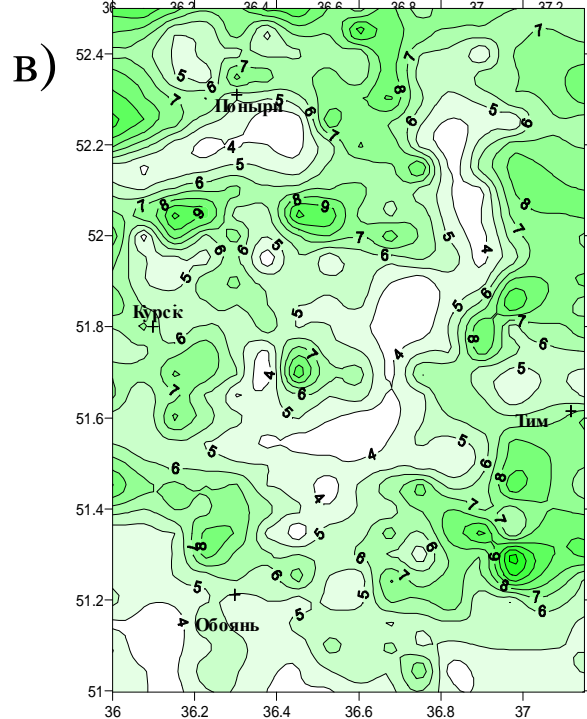
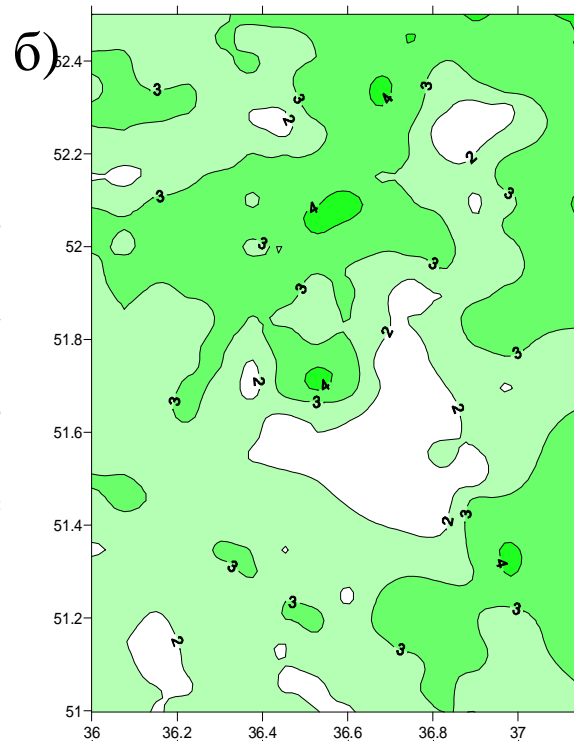
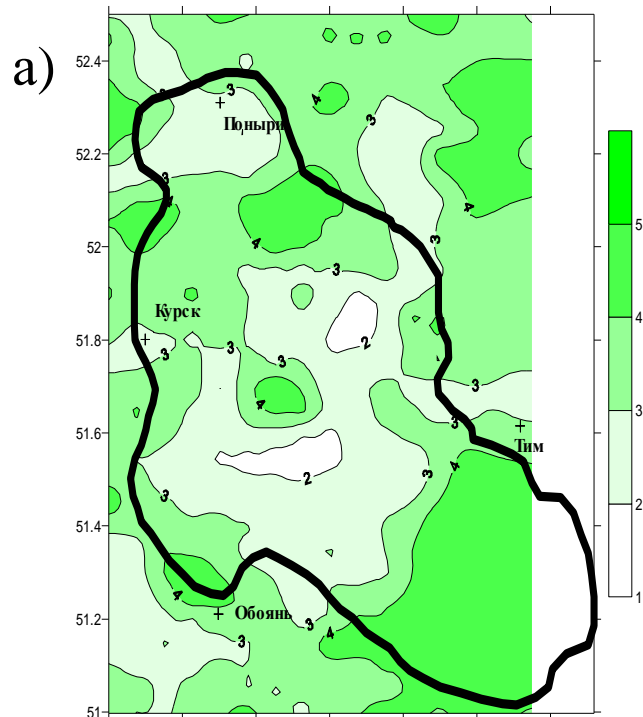
а)



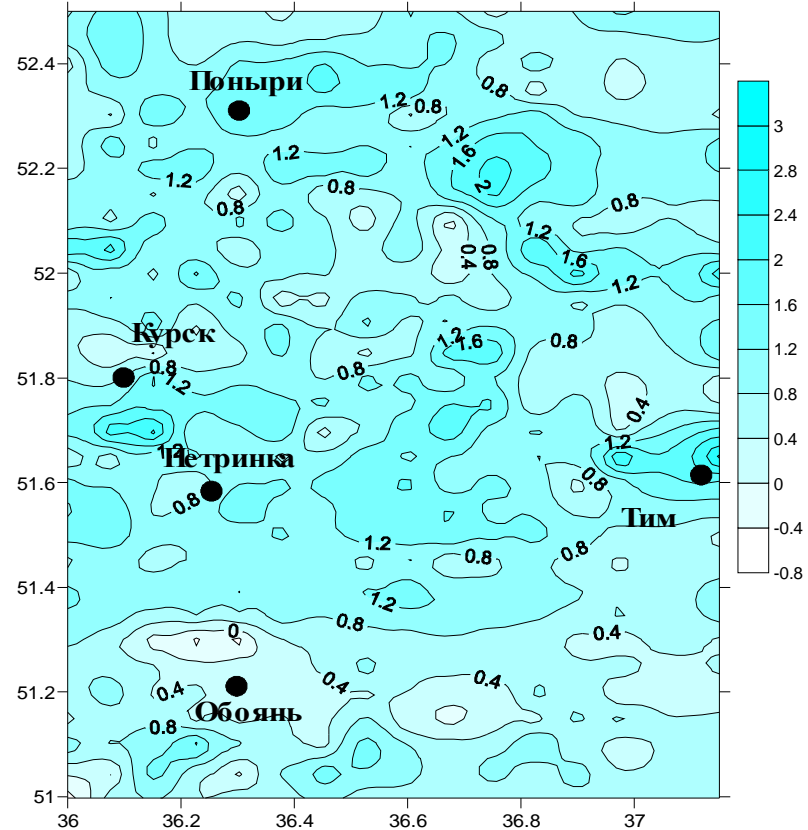
б)



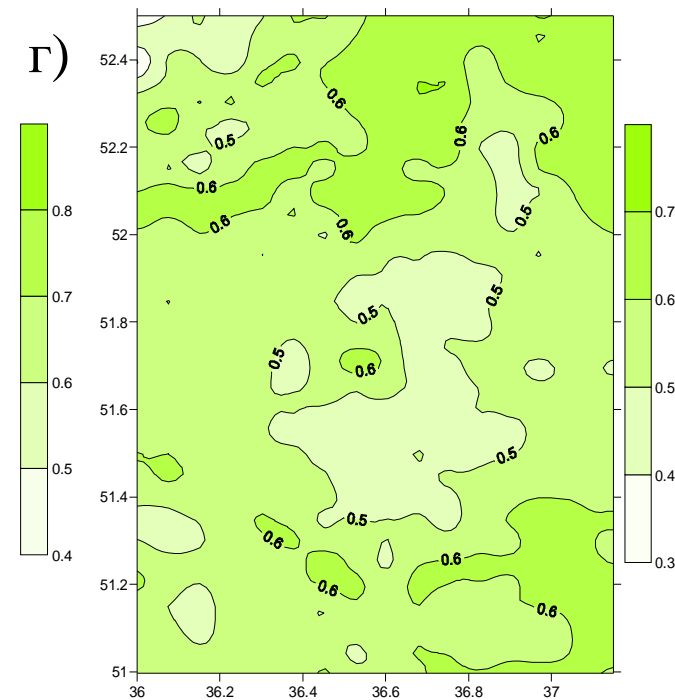
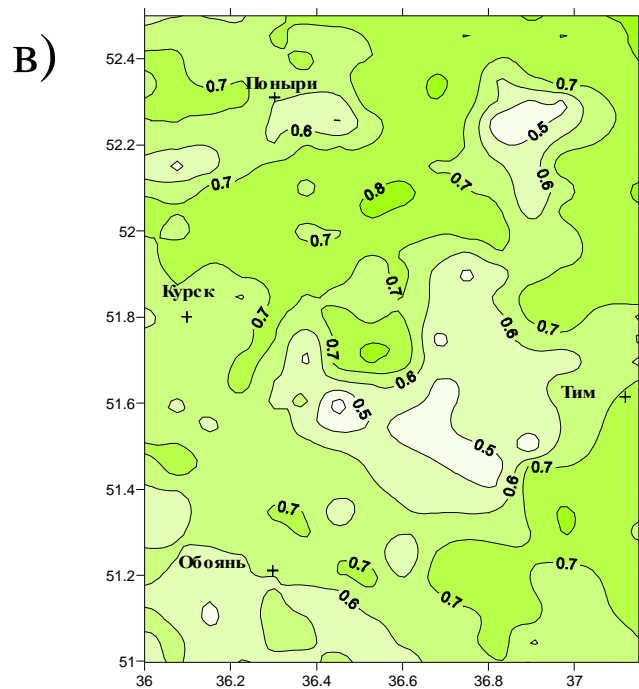
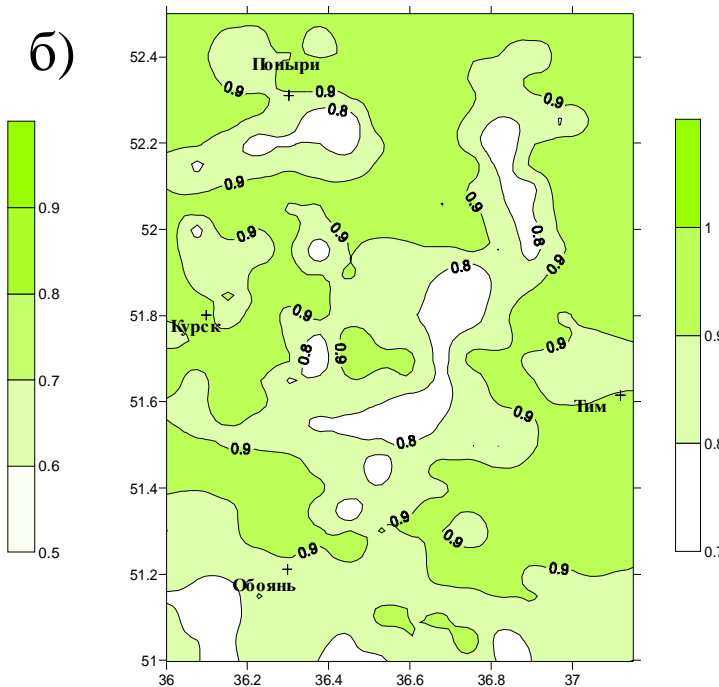
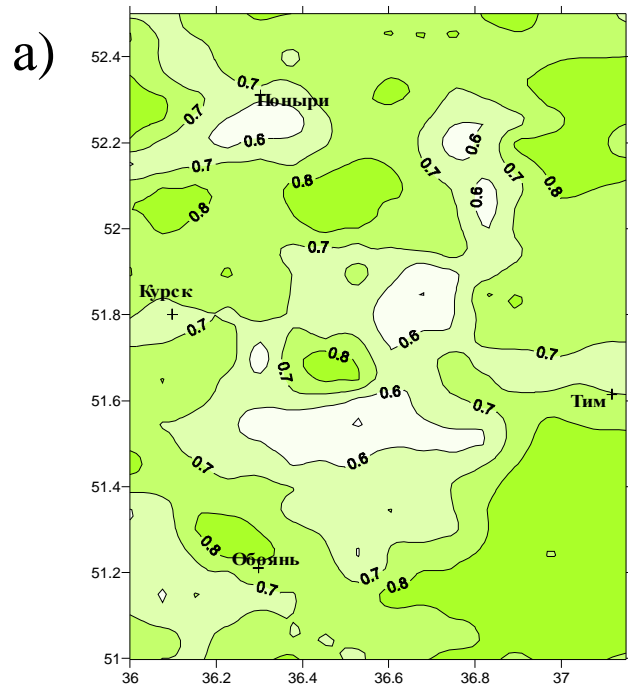
Временной ход проективного покрытия растительностью V , построенный по данным AVHRR (1) и при оценке LAI по данным наземных наблюдений (2) для участков с многолетними травами на агрометеостанциях Курск для сезона вегетации 1999 г. (а) и Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г. (б).



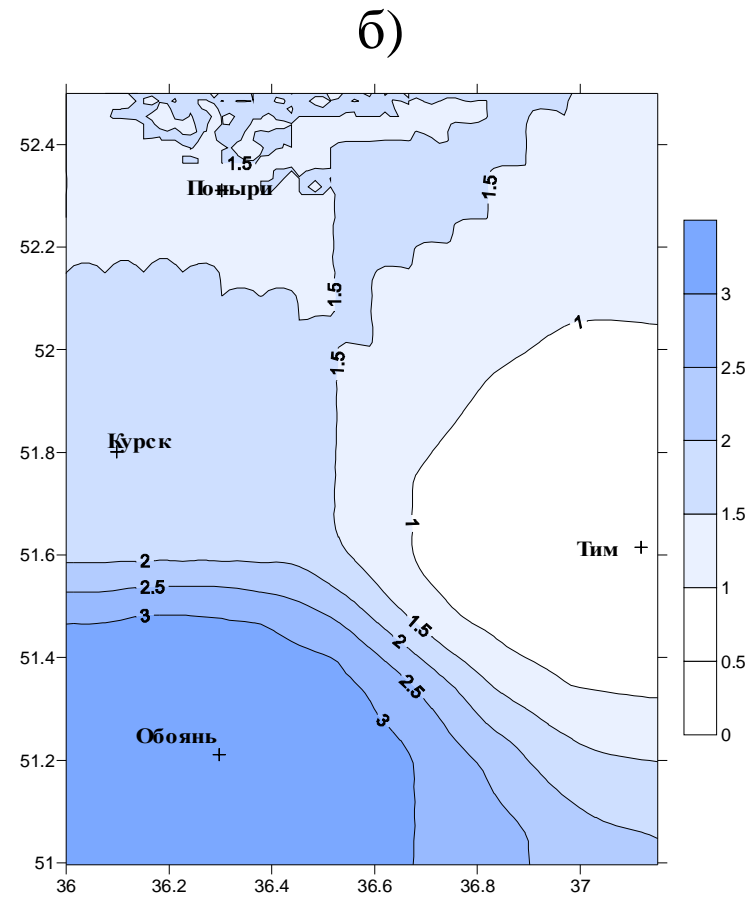
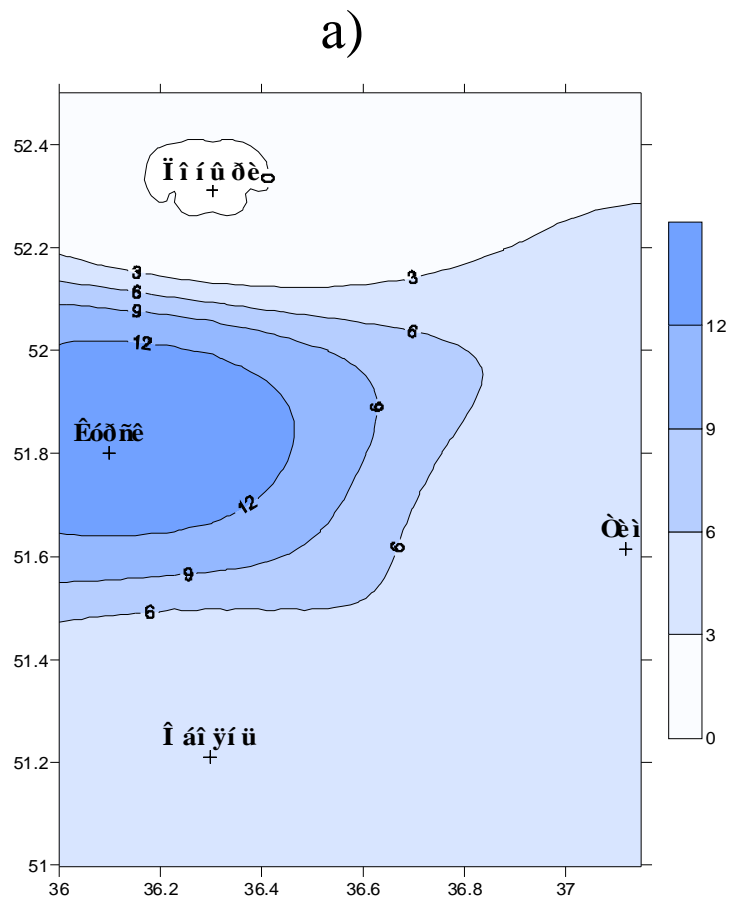
Распределения
листового индекса
LAI, построенные
по данным
AVHRR/3 для
территории,
включающей
водосбор р.Сейм,
на 14 ч. местного
времени 6 июня (а),
26 июля (б),
17 августа (в),
24 сентября (г)
2008 г.



Разности значений листового индекса
 $LAI(MODIS) - LAI(AVHRR)$ для территории Курской
модельной области на 14 ч. местного времени 6 июня 2008 г.

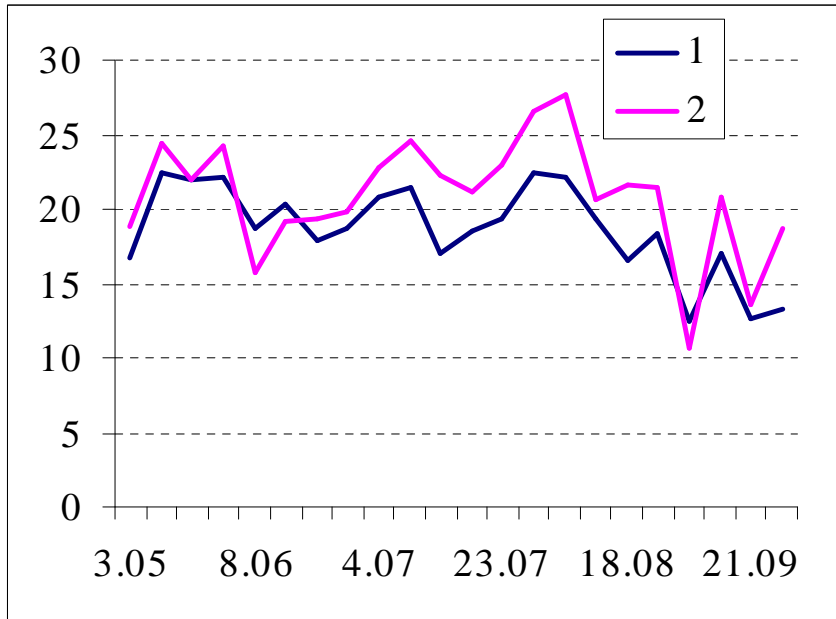


Распределения проективного покрытия растительностью В, полученного по данным AVHRR/3, для территории Курской модельной области на 21 апреля (а), 6 июня (б), 17 августа (в), 24 сентября (г) 2008 г., 14 ч. местного времени

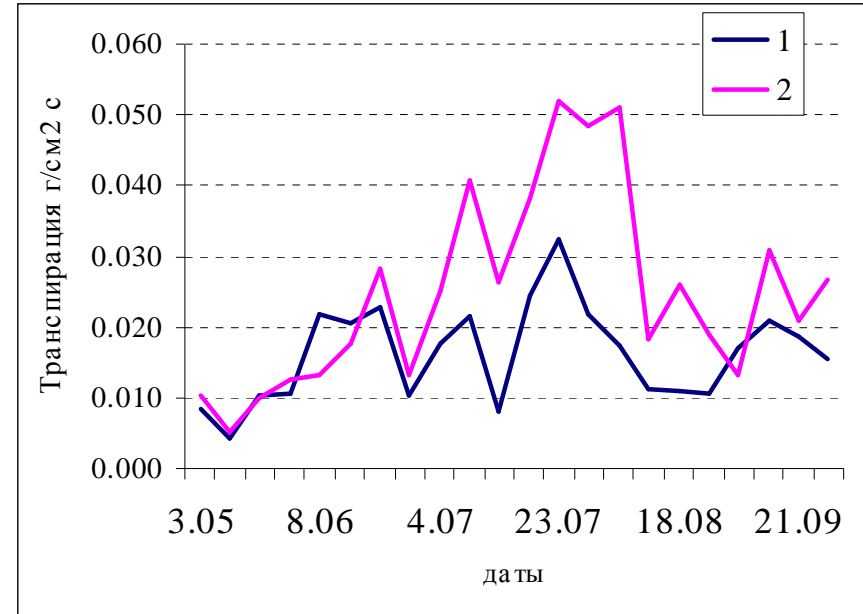


Распределения осадков по территории Курской модельной области (в мм слоя), построенные с использованием интерполяционных процедур по данным наблюдений на агрометеостанциях за 21 апреля (а) и 24 сентября (б) 2008 г.

а)

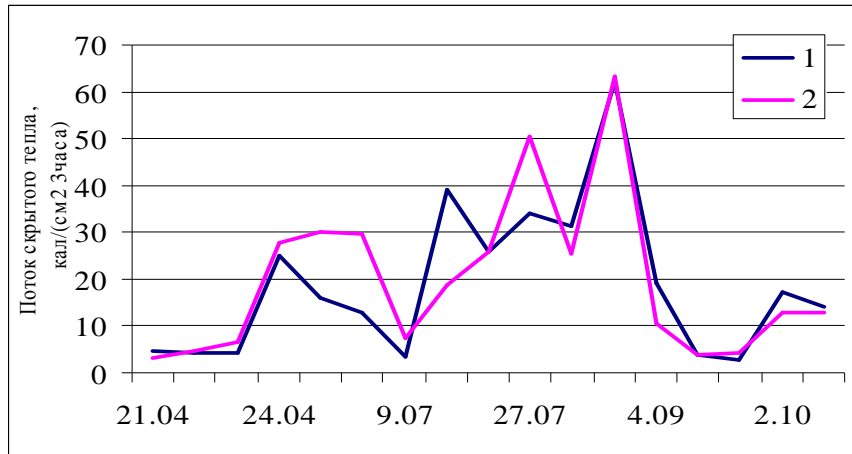


б)

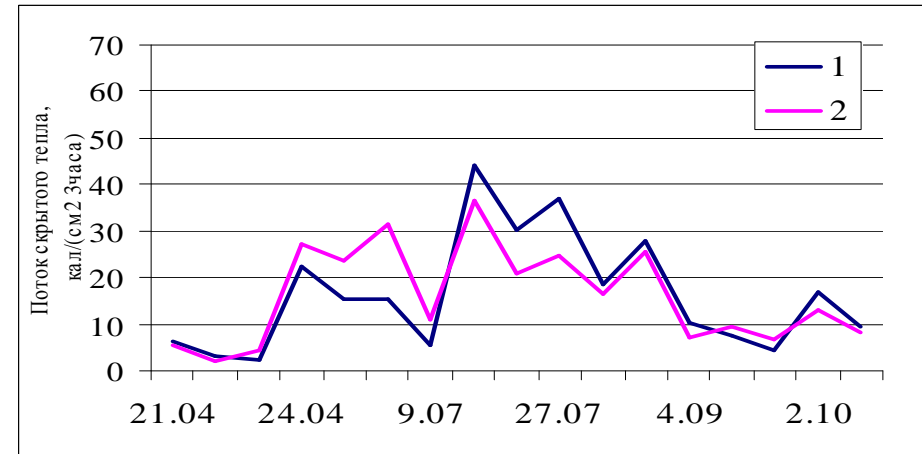


Температура поверхности растительного покрова (а), определенная по данным радиометра AVHRR/NOAA для 13 (1) и 14 (2) ч. местного времени, и рассчитанные по модели значения интенсивности транспирации (б) при использовании значений температур (1) и (2), соответственно. Агростанция Каменная степь, 2003 г.

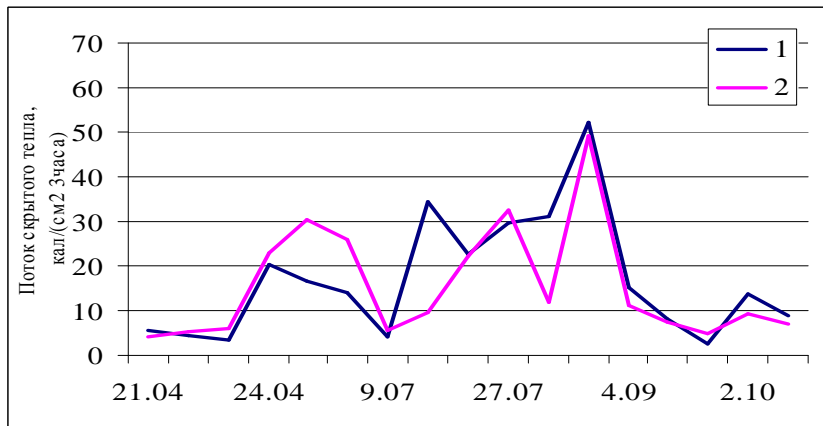
а) Курск



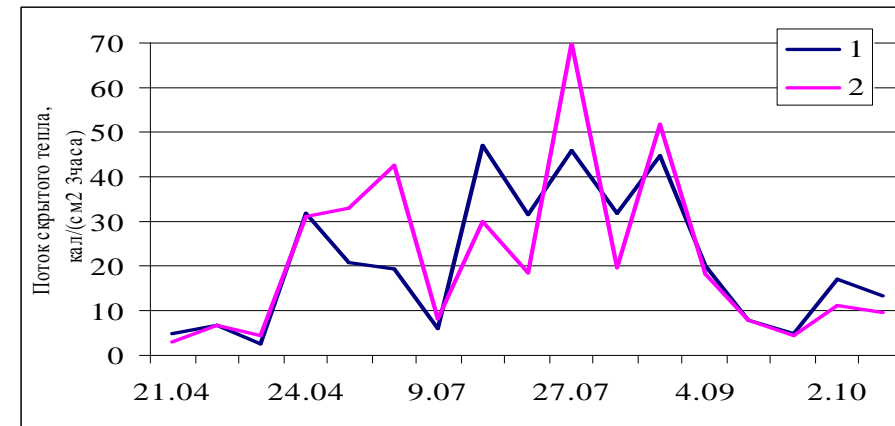
б) Обоянь



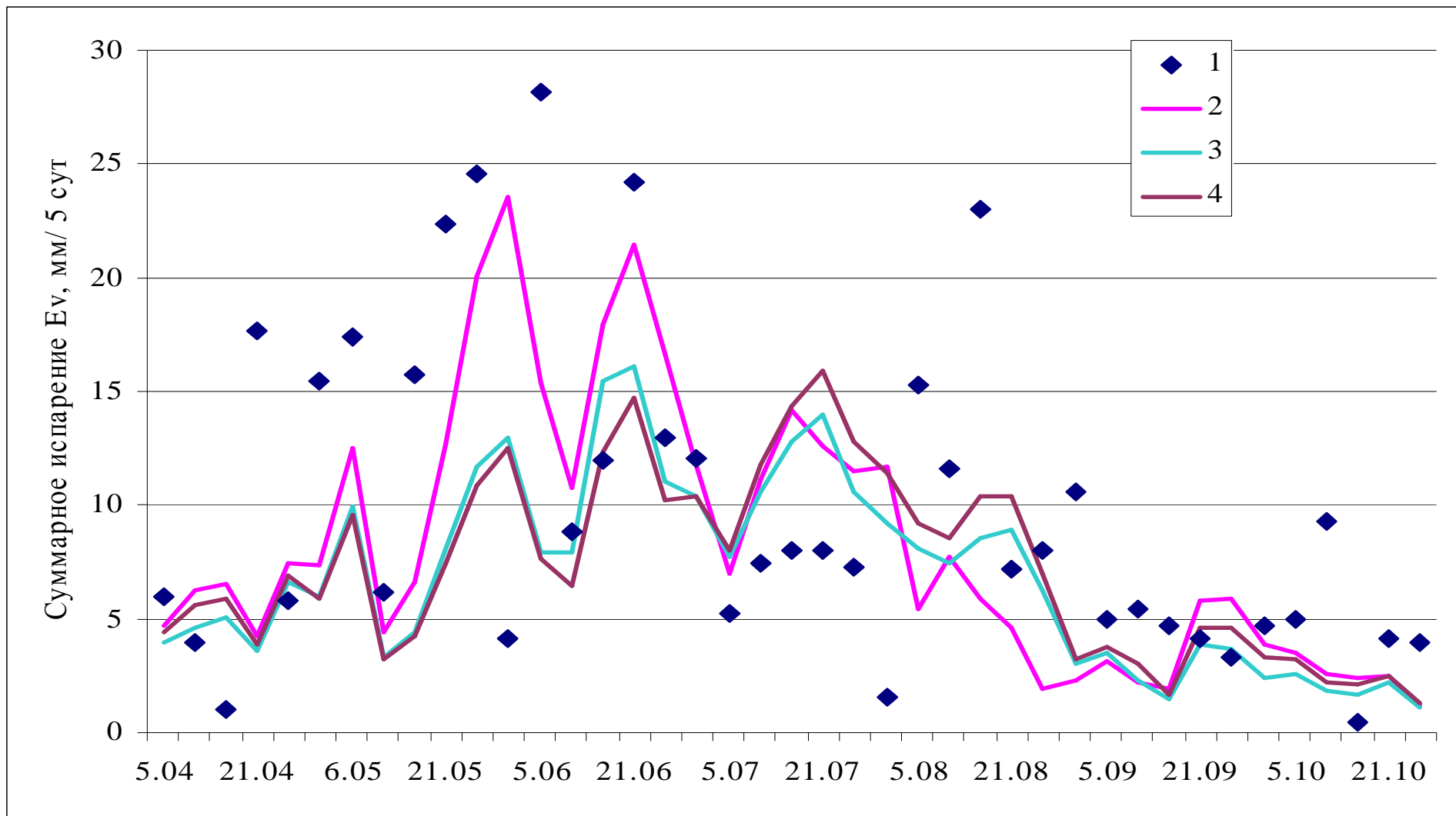
в) Поньри



г) Тим

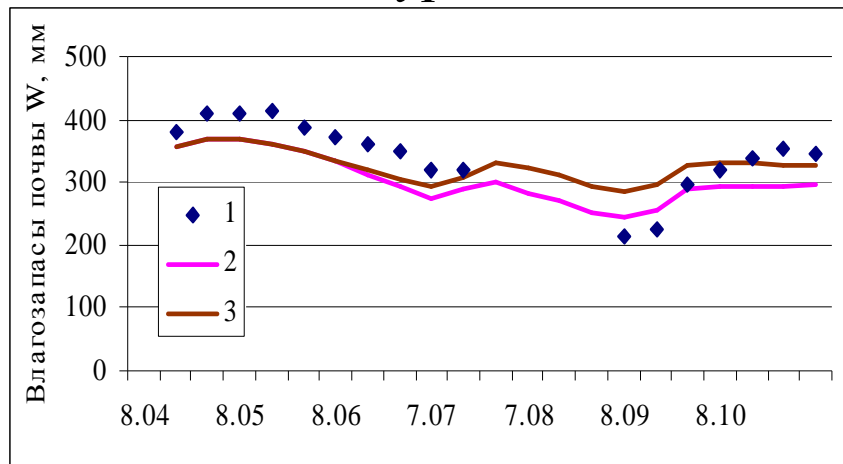


Потоки скрытого тепла LE для четырех агрометеостанций, рассчитанные с использованием: модельных оценок температур подстилающей поверхности по наземным данным и осредненных спутниковых оценок LAI (1); оценок той же температуры и LAI для зерновых культур по данным AVHRR/3 в конкретные указанные сроки (время пролёта спутника - 14 ч. местного времени) (2). 2008 г.

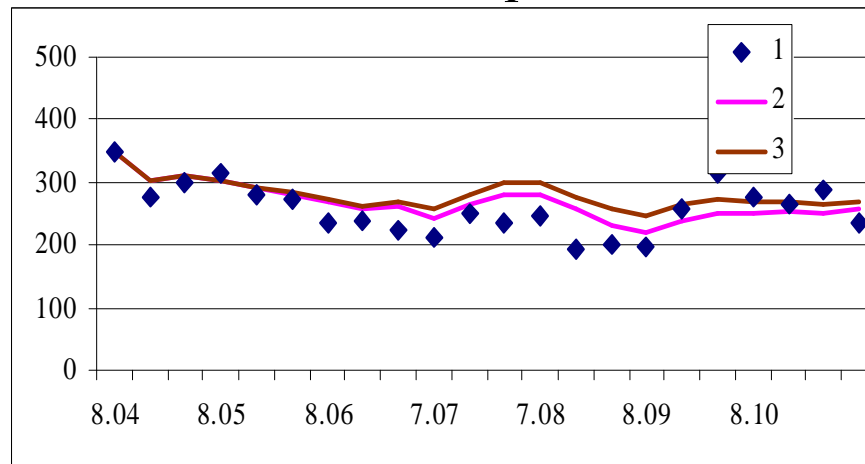


Значения суммарного испарения E_v для сезона вегетации 2008 г.:
измеренные на участке с многолетними травами на воднобалансовой
станции Нижнедевицк (1); рассчитанные по модели при оценках LAI по
данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и многолетних трав (4) и
при оценках LAI по данным MODIS (3).

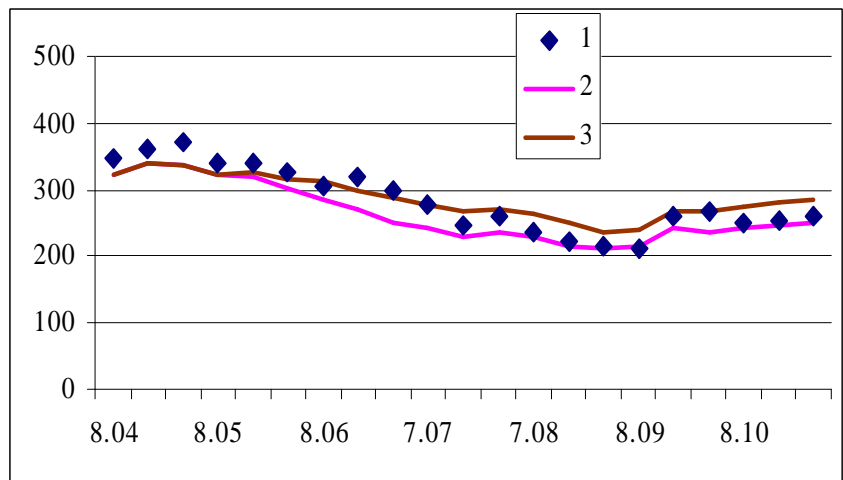
а) Курск



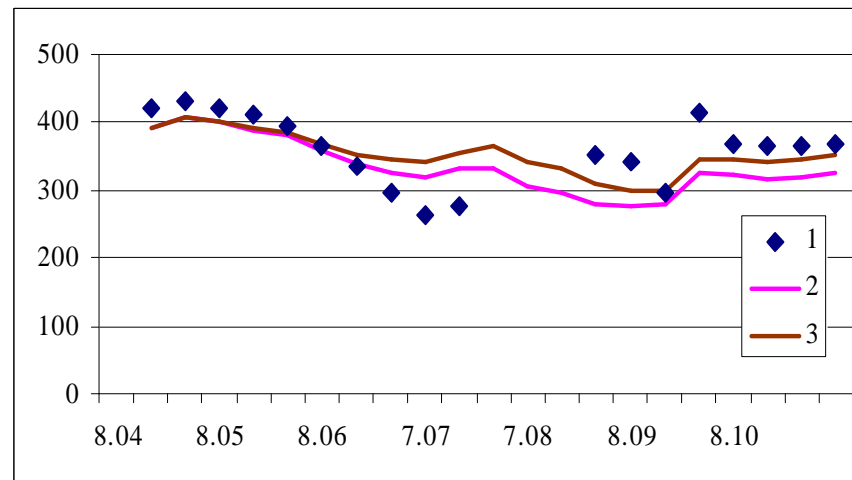
б) Поньри



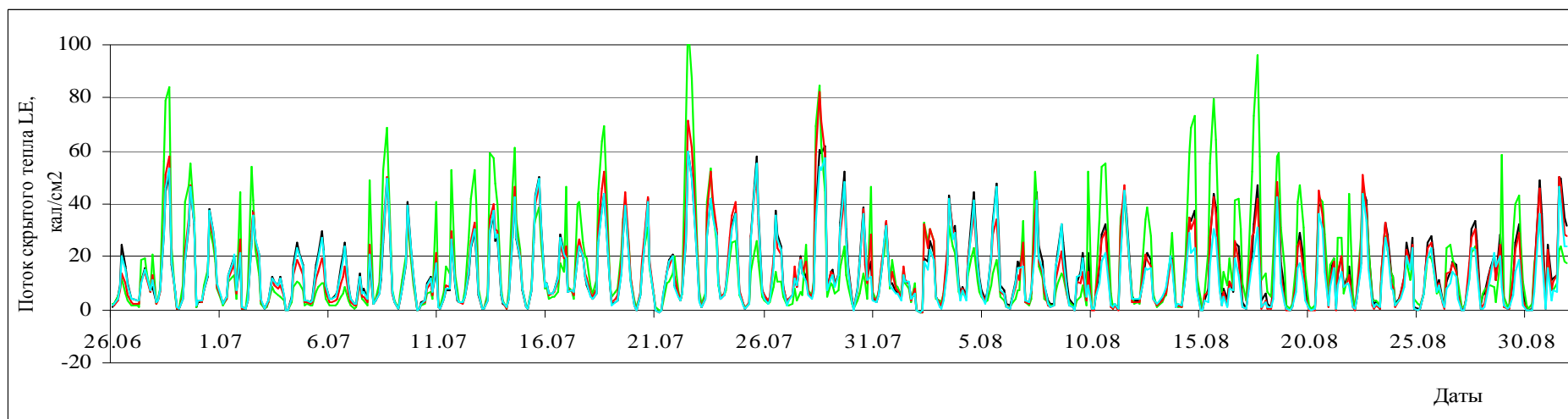
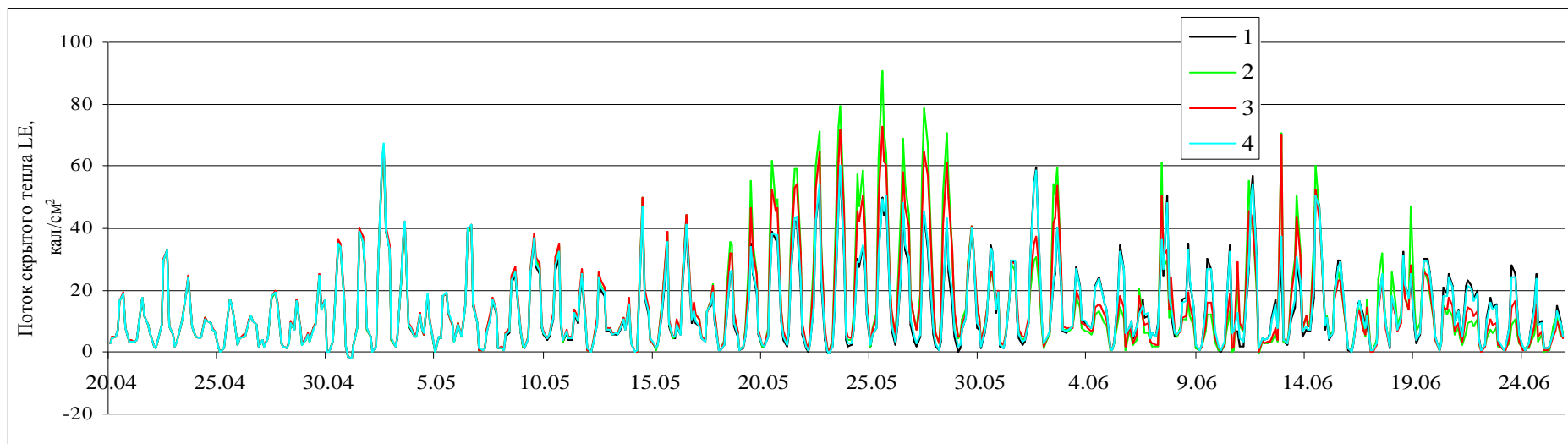
в) Нижнедевицк



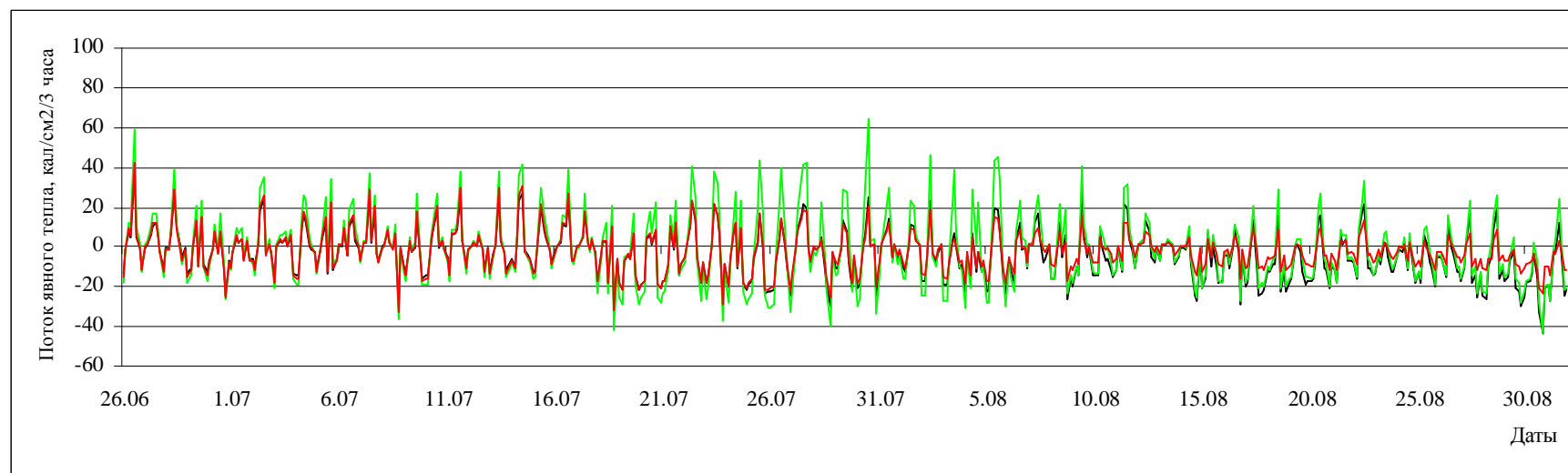
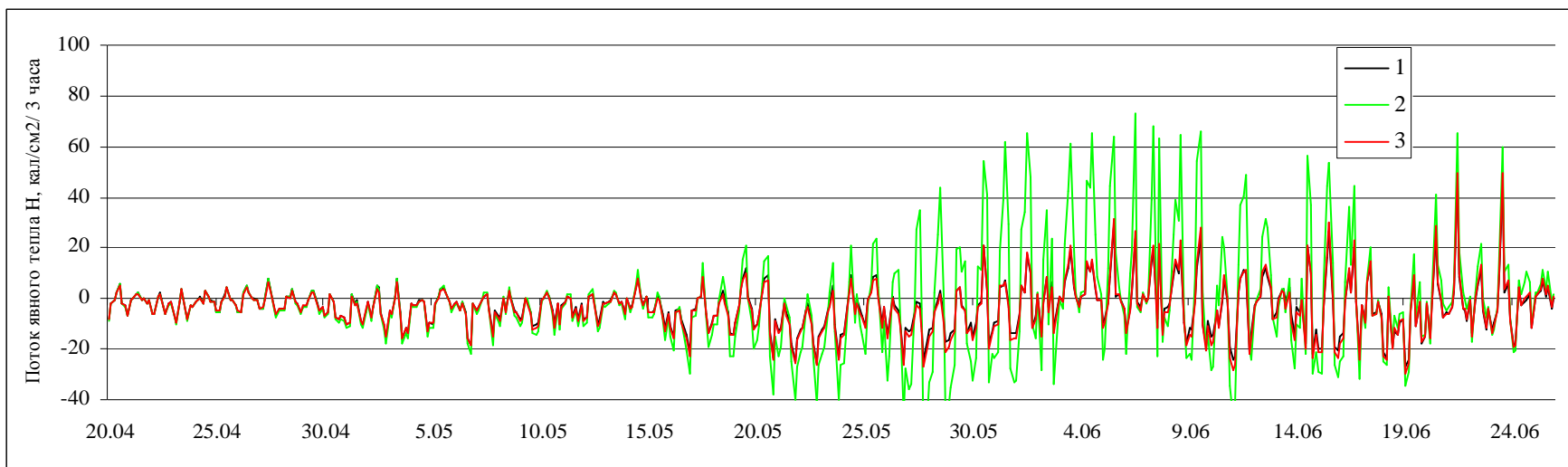
г) Тим



Временной ход влагозапасов почвы (в мм слоя), измеренных на четырех агрометеостанциях под зерновыми культурами (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/3 для зерновых культур (2) и по данным MODIS (3) для сезона вегетации 2008 г.

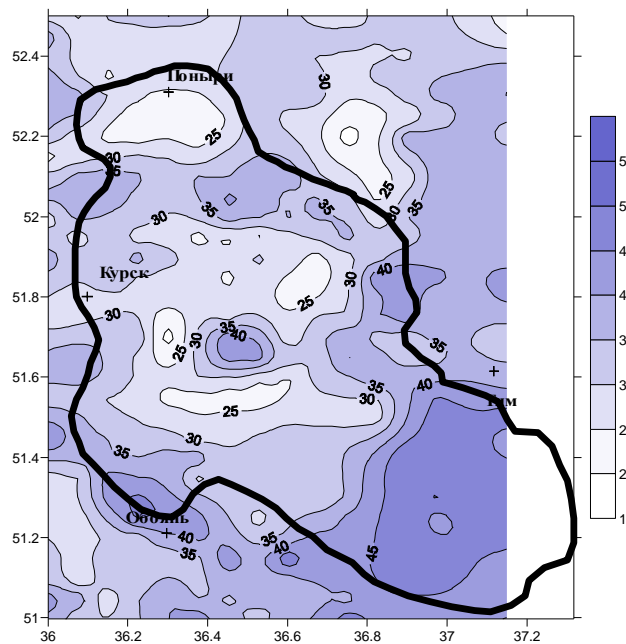


Поток скрытого тепла, рассчитанный по модели при оценке LAI по данным AVHRR для многолетних трав (1) и зерновых культур (2), по данным MODIS (3) и наземным данным для участка с многолетними травами (4). Агростанция Нижнедевицк, 2003 г.

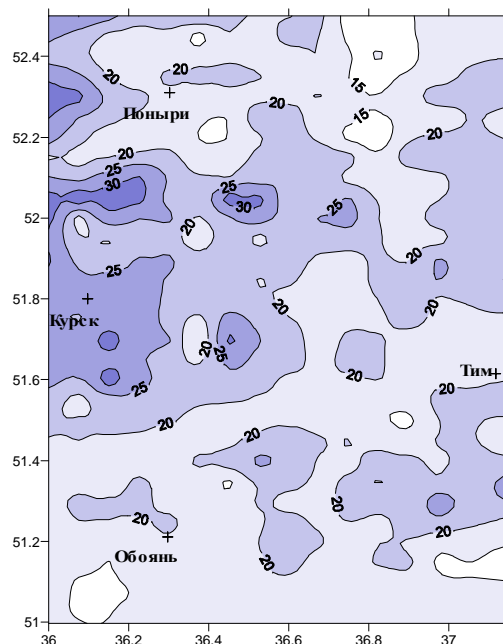


Поток явного тепла, рассчитанный по модели при оценке LAI по данным AVHRR (1), MODIS (2) и наземным данным (3) для участка с многолетними травами. Агростанция Нижнедевицк, 2003 г.

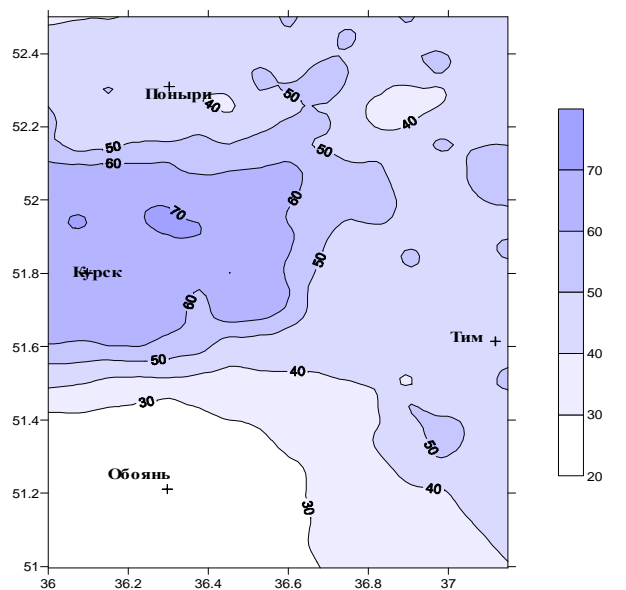
а)



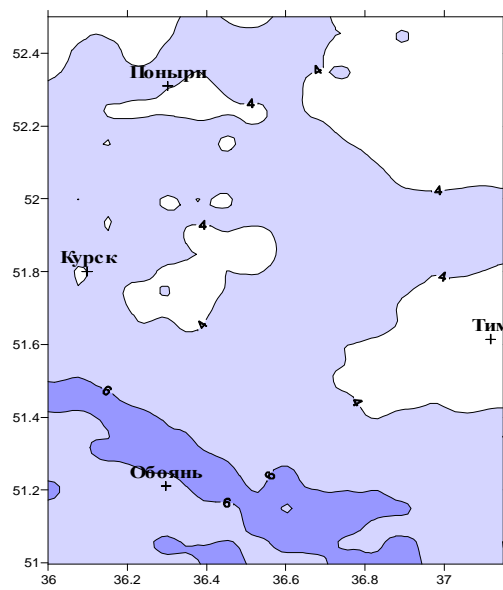
б)



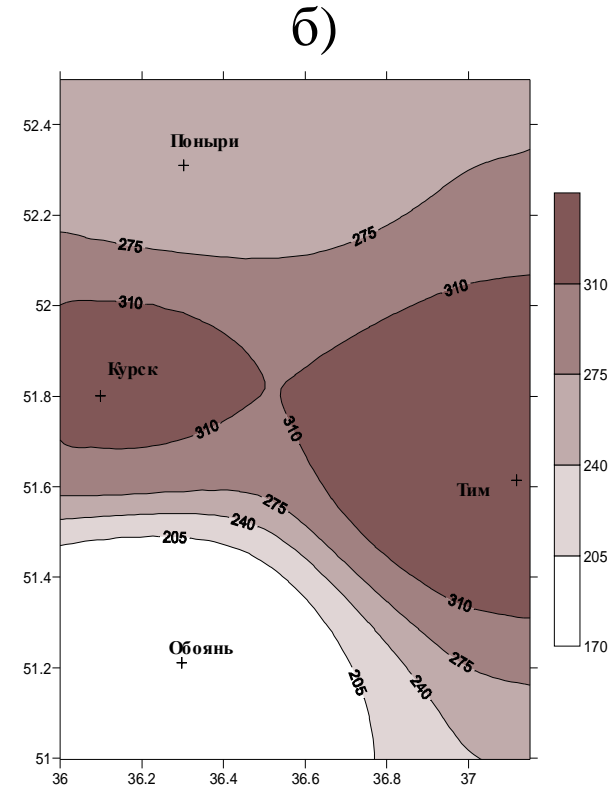
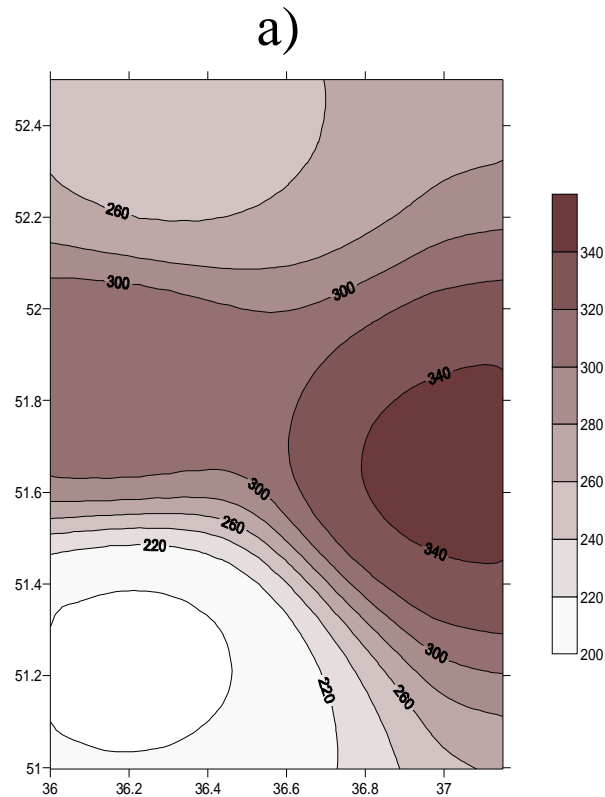
в)



г)

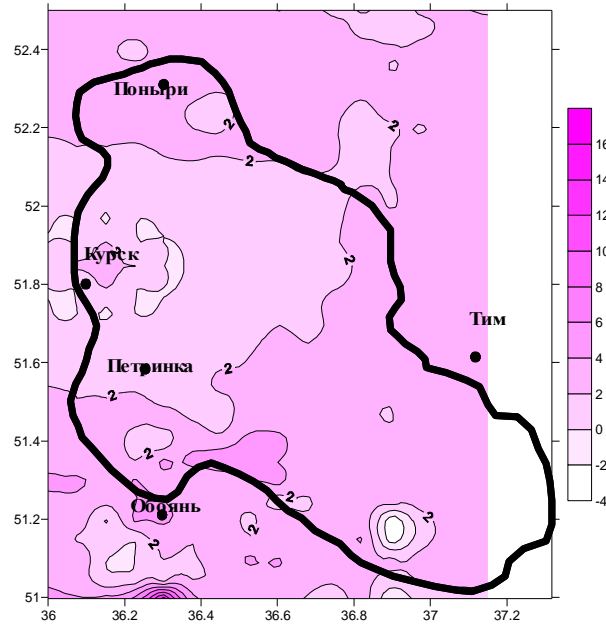


Потоки скрытого
тепла LE,
рассчитанные по
модели с учетом
пространственных
распределений оценок
LAI и температуры
подстилающей
поверхности по
данным AVHRR/3 для
территории,
включающей водосбор
р.Сейм, на 14 ч.
местного времени 6
июня (а), 26 июля (б),
17 августа (в),
24 сентября (г) 2008 г.

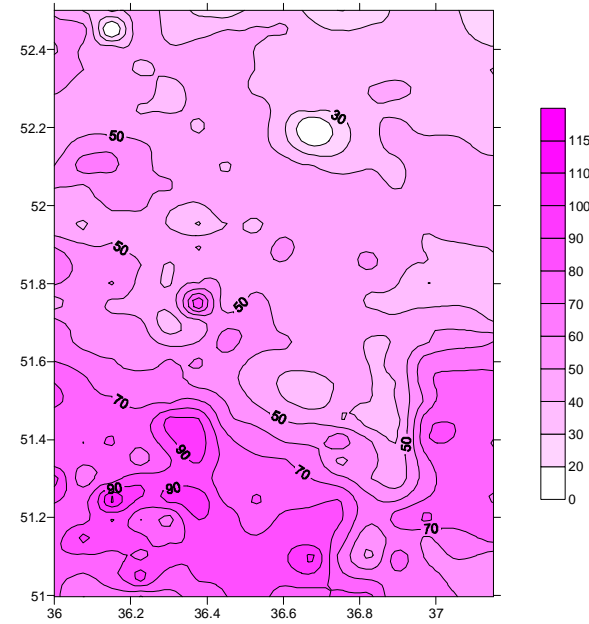


Влагозапасы почвы, рассчитанные по модели с учетом пространственных распределений оценок LAI и температуры подстилающей поверхности по данным AVHRR/3 для территории, включающей водосбор р.Сейм, на 14 ч. местного времени 6 июня (а), 24 сентября (б) 2008 г.

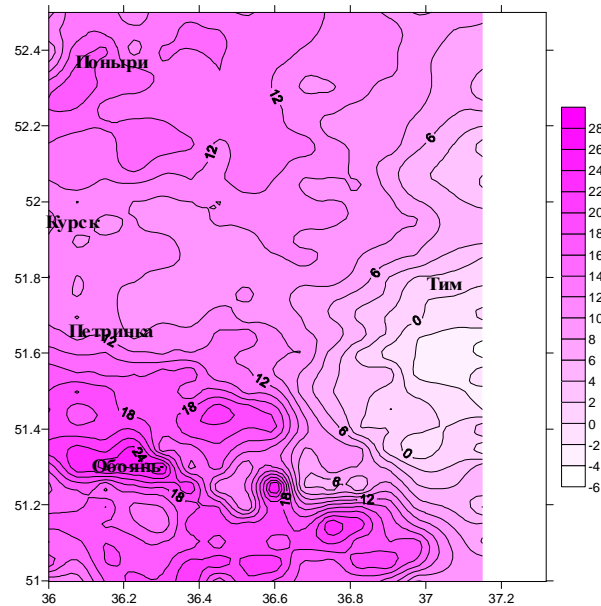
а)



б)



в)



Потоки явного тепла H ,
 рассчитанные по модели с учетом
 пространственных распределений
 оценок LAI и температуры
 подстилающей поверхности по
 данным AVHRR/3 для территории,
 включающей водосбор р.Сейм, на
 14 ч. местного времени 21 апреля (а),
 6 июня (б), 24 сентября (в) 2008 г.

К основным результатам настоящей работы относятся:

1 Усовершенствованные методы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA для оценки температуры T_g и излучательной способности E почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова T_a , эффективной радиационной температуры $T_{s,eff}$ (взвешенной линейной комбинации T_a и T_g), нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью B и MODIS/Terra и Aqua для оценки $T_{s,eff}$, E , NDVI и LAI.

2. Адаптированная к спутниковым данным версия физико-математической модели SVAT, предназначенной для расчета вертикальных потоков влаги и тепла, профилей влажности и температуры почвы, а также температур поверхности почвы и растительности для различных сроков в течение сезона вегетации. При разработке способов усвоения в модели спутниковых данных выявлены возможности замены данных наземных наблюдений при задании временного хода LAI и B , а также температур поверхности на спутниковые оценки этих величин. Введение в модель спутниковых оценок названных характеристик производится с учетом реальных распределений их значений по площади. Подобный подход может использоваться для расчета составляющих водного и теплового балансов речного водосбора, слабо освещенного или совсем не освещенного данными наземных наблюдений.