

Использование оценок температур подстилающей  
поверхности и характеристик растительности по  
спутниковой информации высокого разрешения при  
моделировании вертикального тепло- и влагообмена  
на речном водосборе

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

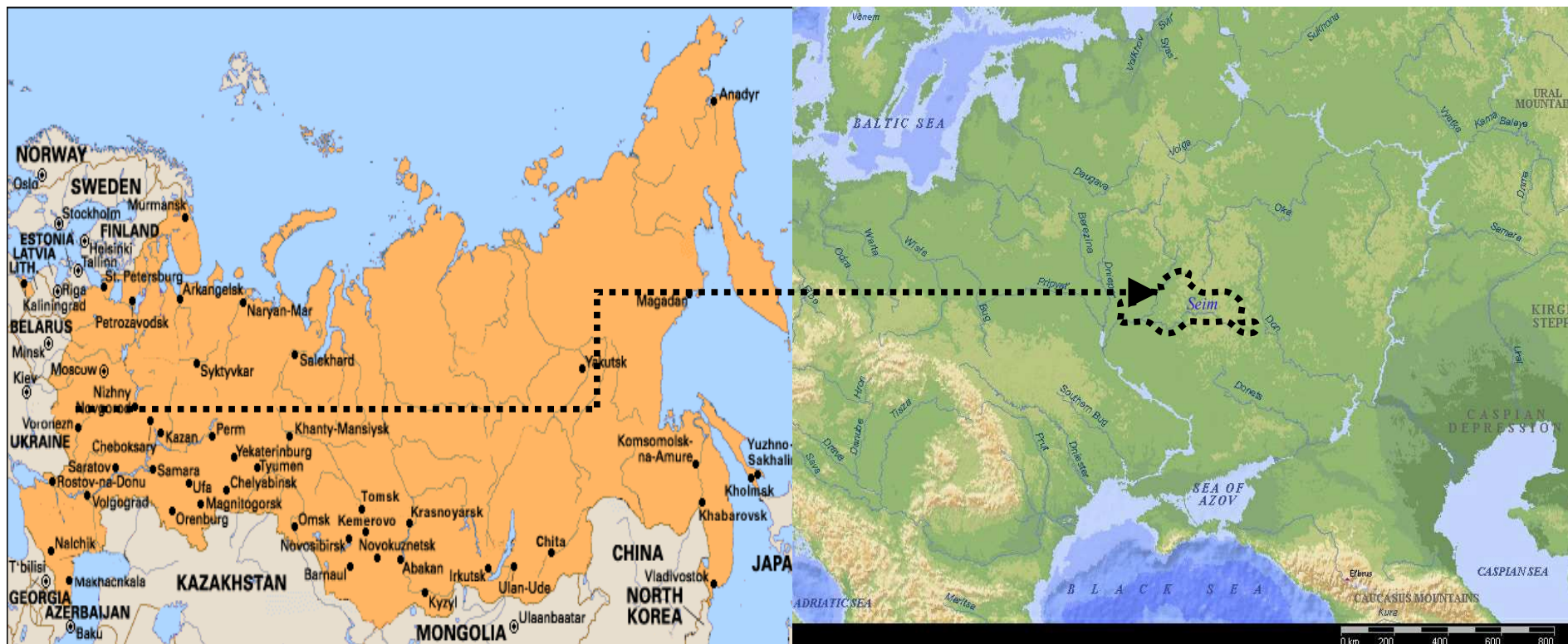
<sup>1</sup> Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр космической  
гидрометеорологии "Планета" Росгидромета,  
г.Москва

## Основные цели данной работы:

- разработка и испытание методов и алгоритмов тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/EOS Terra и Aqua для дистанционного определения температуры  $T_g$  и излучательной способности  $\varepsilon$  почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова  $T_a$ , эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности  $T_{s,eff}$ , облачности, нормализованного индекса вегетации NDVI, листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью  $B$  с целью их использования в модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT);
- разработка версии модели SVAT, рассчитанной на использование спутниковых оценок названных характеристик для ее калибровки, верификации и проведения расчетов вертикальных потоков тепла и влаги и других составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора

Исследования проводились на примере находящегося в лесостепной зоне центральной части России водосбора р.Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км<sup>2</sup> для сезонов вегетации 1997, 1999-2006 гг.



Метод определения температуры воздуха у поверхности растительного покрова  $T_a$ , температуры  $T_g$  и излучательной способности  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$ ;
- 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  $\mu\text{m}$ ) и 5-ом (11,5-12,5  $\mu\text{m}$ ) каналах радиометра AVHRR

## **Оценка температуры поверхности почвы по данным AVHRR**

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

$\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_5$  – оценки излучательной способности для 4-го и 5-го каналов радиометра AVHRR, полученные с привлечением априорных моделей  $\varepsilon$ , 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  $\varepsilon$  и вегетационным индексом NDVI и/или между  $\varepsilon$  и проективным покрытием  $B$

## **Излучательная способность подстилающей поверхности**

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

$\varepsilon_v$  и  $\varepsilon_g$  – “типичные” значения для различных почв и видов растительности,  $B$  – проективное покрытие

## **Эффективная радиационная температура подстилающей поверхности**

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

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

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

## **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

Для разработки методов анализа спутниковых данных был создан архив синхронных спутниковых и наземных наблюдений за периоды вегетации 1997, 1999-2006 гг., который содержал данные измерений радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-12, -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,  $\epsilon$ , B,  $T_a$ ,  $T_g$ ,  $T_{s.eff}$  выполнялись для фрагментов изображения размером 3x3 пиксела, соответствовавших ячейке сетки модели SVAT площадью  $\approx 5 \times 7$  км<sup>2</sup>. 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.

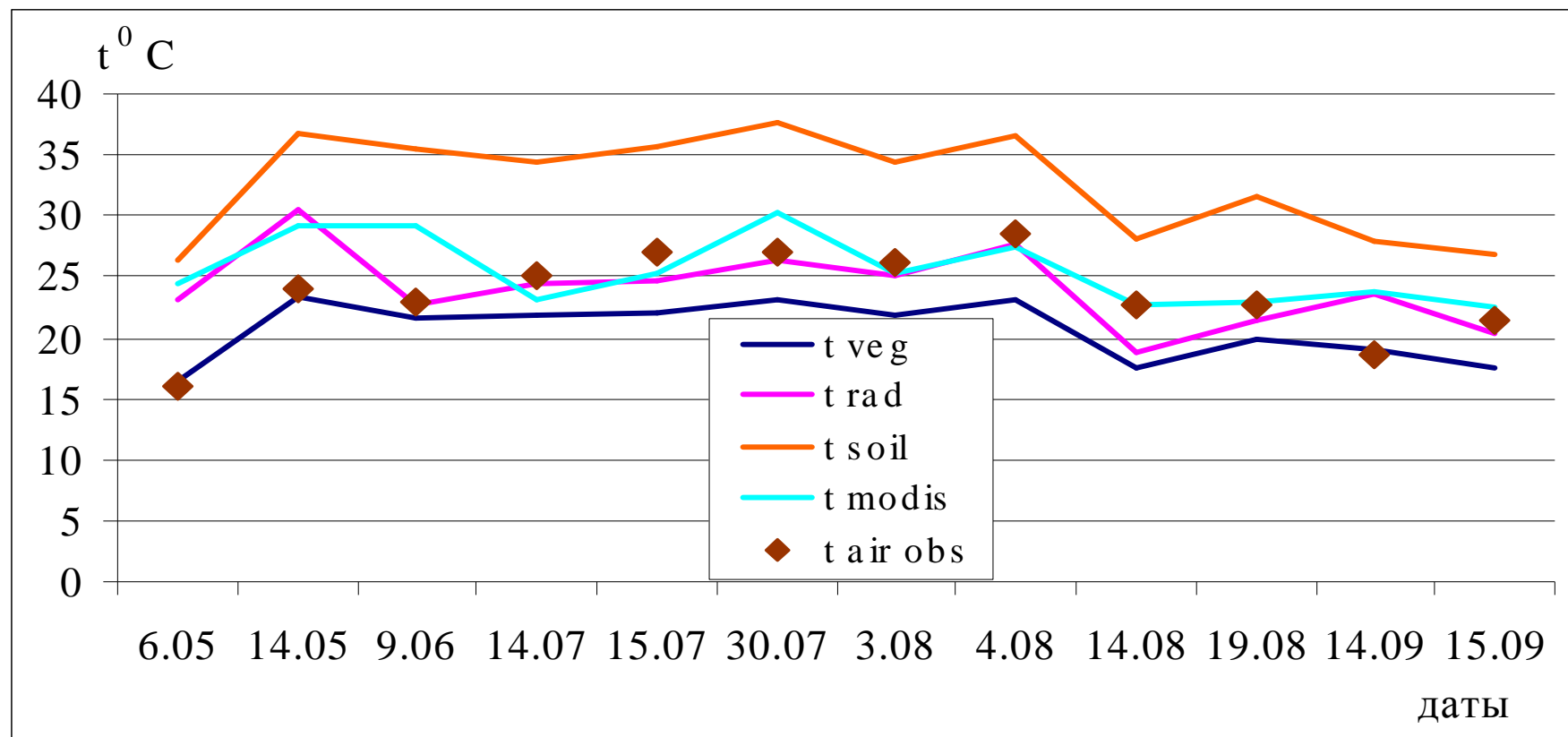
Агрометеостанция	N	NDVI	B	$T_a$			$T_{s.eff}$			$T_{sg}$		
				Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто
Курск	64	0,386	0,57	-0,96	2,41	2,21	-0,98	2,96	2,80	-0,73	4,51	4,45
Обоянь	61	0,349	0,50	-1,31	2,83	2,51	-1,42	3,64	3,35	-1,38	4,79	4,59
Поныри	51	0,343	0,49	0,44	2,53	2,50	0,63	3,38	3,32	0,41	4,91	4,89
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 EOS/Terra и Aqua величин  $T_{sg}$ ,  $T_{s.eff}$ , NDVI, LAI и излучательной способности  $E$  подстилающей поверхности для области (т.н. "гранулы"), в которую входит территория водосбора р.Сейм, были получены при использовании ресурсов Интернет. Далее с помощью специально созданного программного обеспечения были выполнены форматное преобразование исходных данных, преобразование проекции и расчет географических координат для пунктов спутникового зондирования. Кроме того, с целью верификации и оценки качества полученных данных были сопоставлены оценки  $T_{s.eff}$ , построенные по информации MODIS и AVHRR (наиболее близкие друг к другу по месту и времени зондирования). Величины среднеквадратического отклонения двух спутниковых оценок радиационной температуры для различных сроков периодов вегетации 2003 - 2005 гг. лежат в диапазоне 0.8 – 1.7°C, что подтверждает приемлемое качество зондирования радиометра MODIS.

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.



## 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

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

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

Коэффициент диффузии

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

Устьичное сопротивление

Аэродинамическое сопротивление

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

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

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

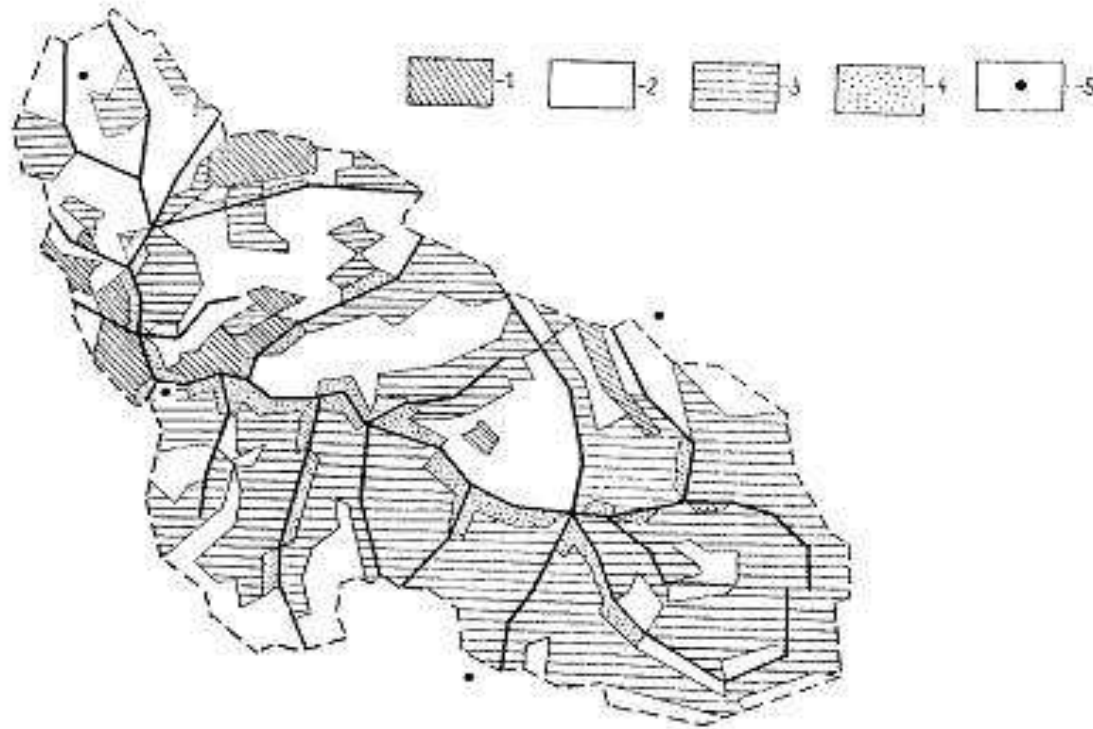
$$R_a = \left[ N_{cl} + (1 - N_{cl})k_2 q_a^{0.08} \right] \sigma T_a^4$$

$N_{cl}$  - 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 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.

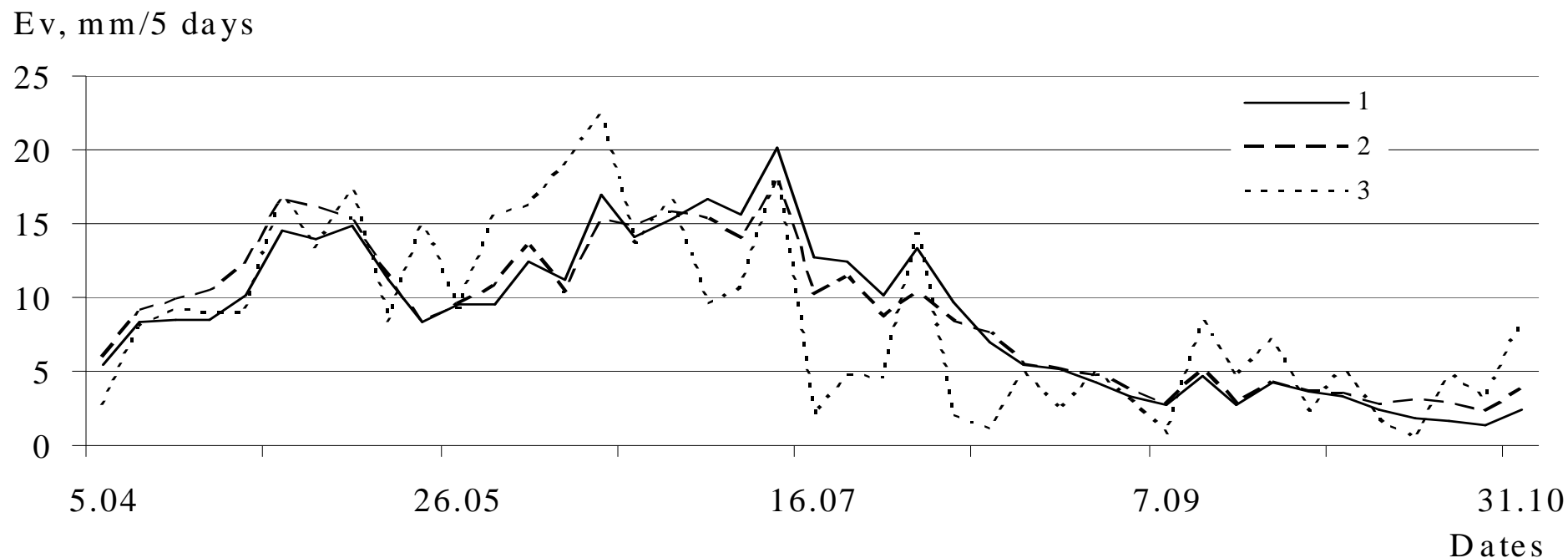
## Распределение основных типов почв по территории водосбора р.Сейм.



Типы почв (1- 4):

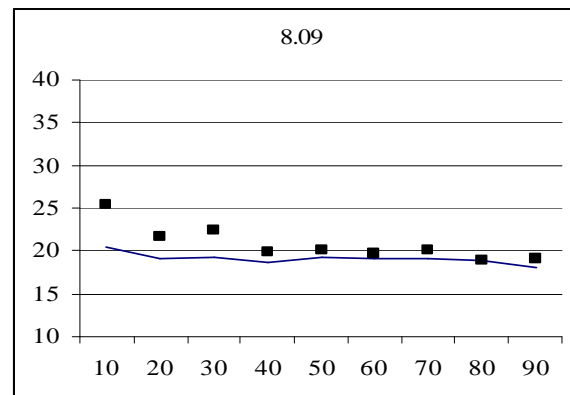
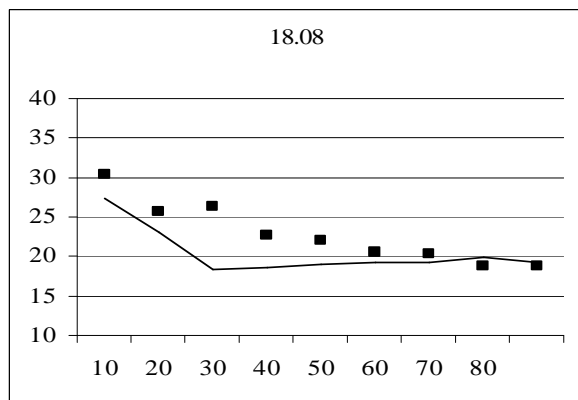
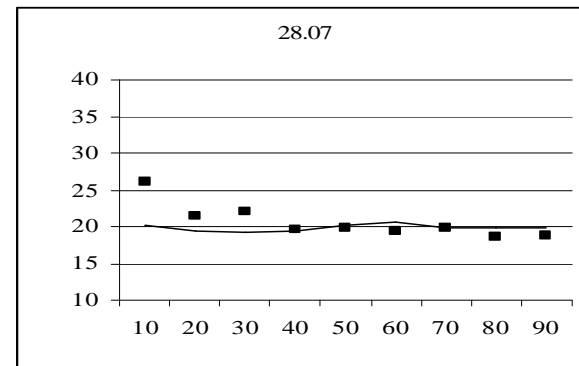
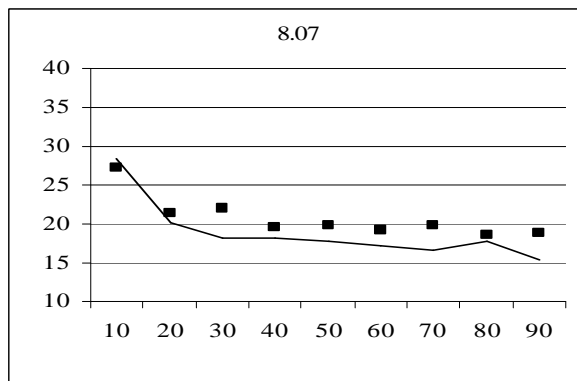
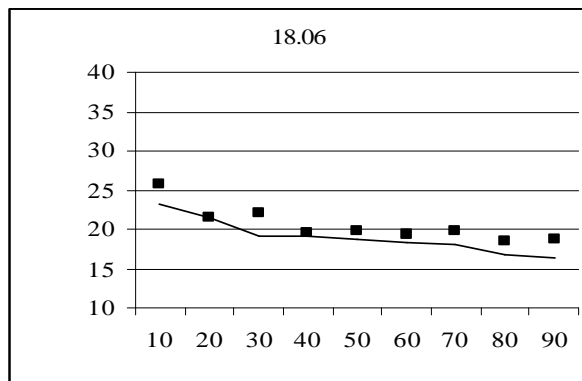
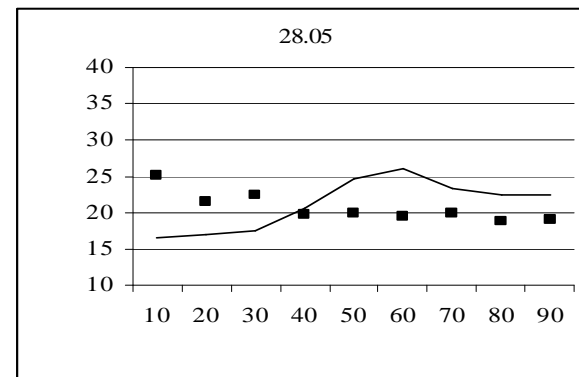
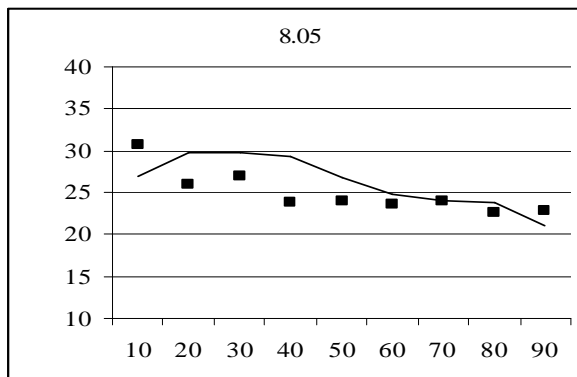
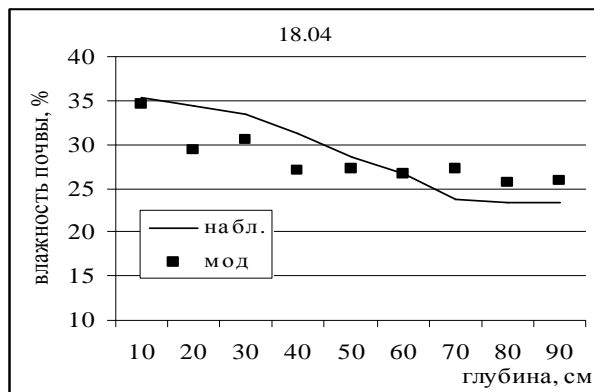
1 – серозёмы; 2 – подзолистые чернозёмы; 3 – типичные чернозёмы; 4 – пойменно-луговые почвы.

5 - агрометеорологические станции.

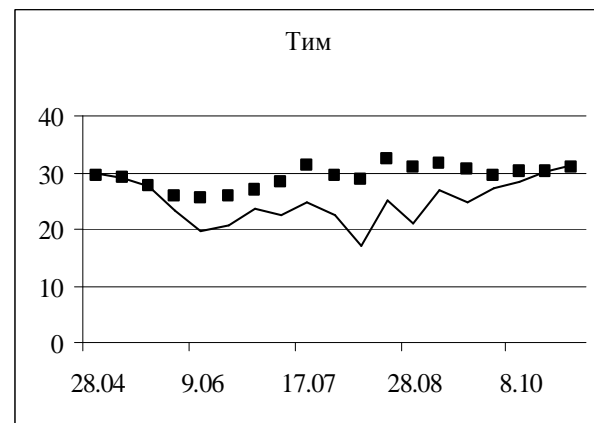
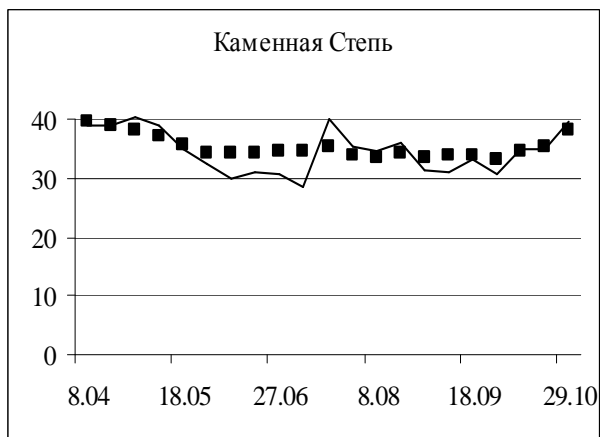
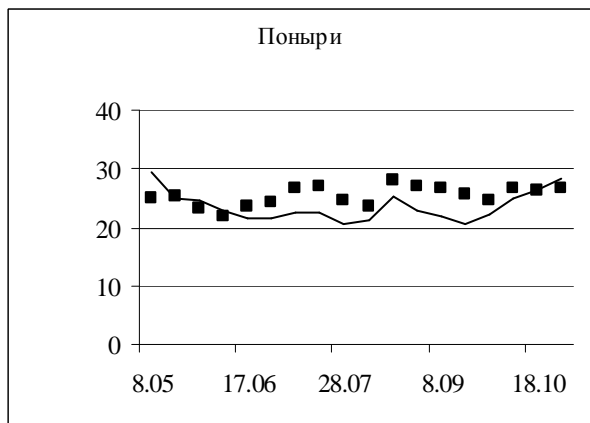
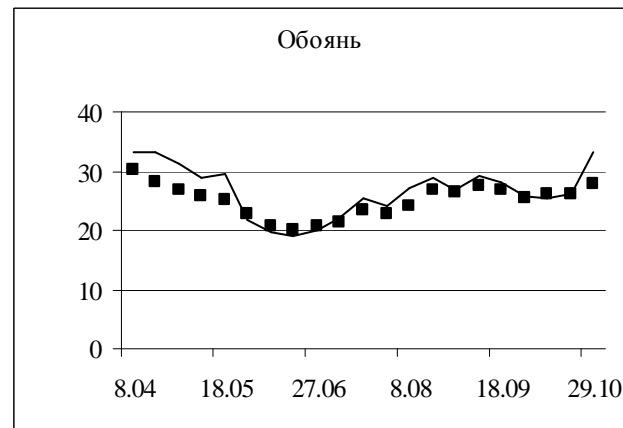
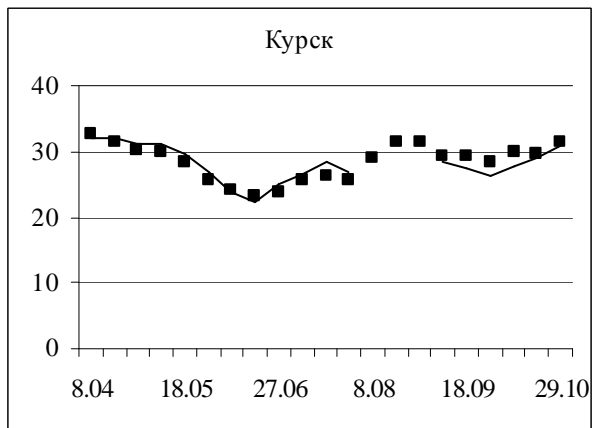
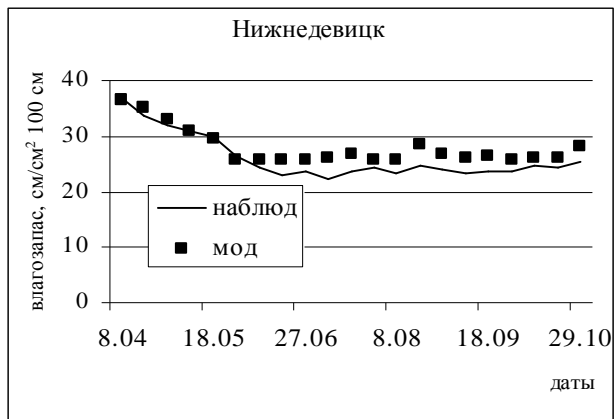


Суммарное испарение  $E_v$  для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2002 г., рассчитанные по модели с использованием значений LAI, определенных по наземным (1) и спутниковым (AVHRR) (2) данным. Кривая (3) соответствует измеренным значениям  $E_v$ .

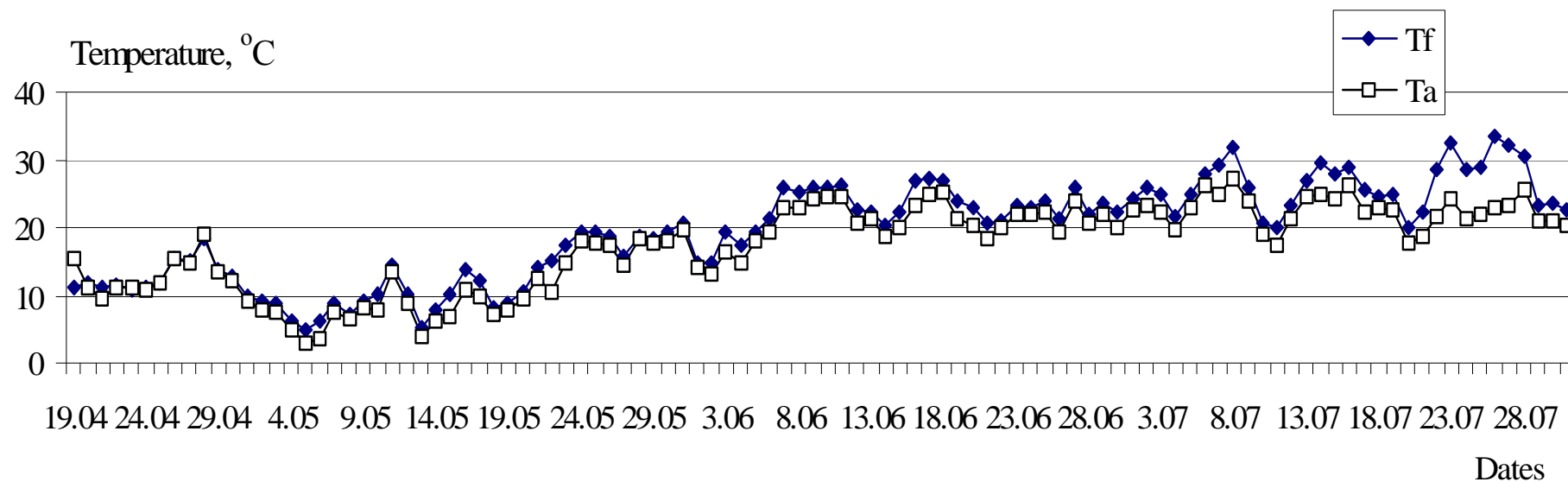




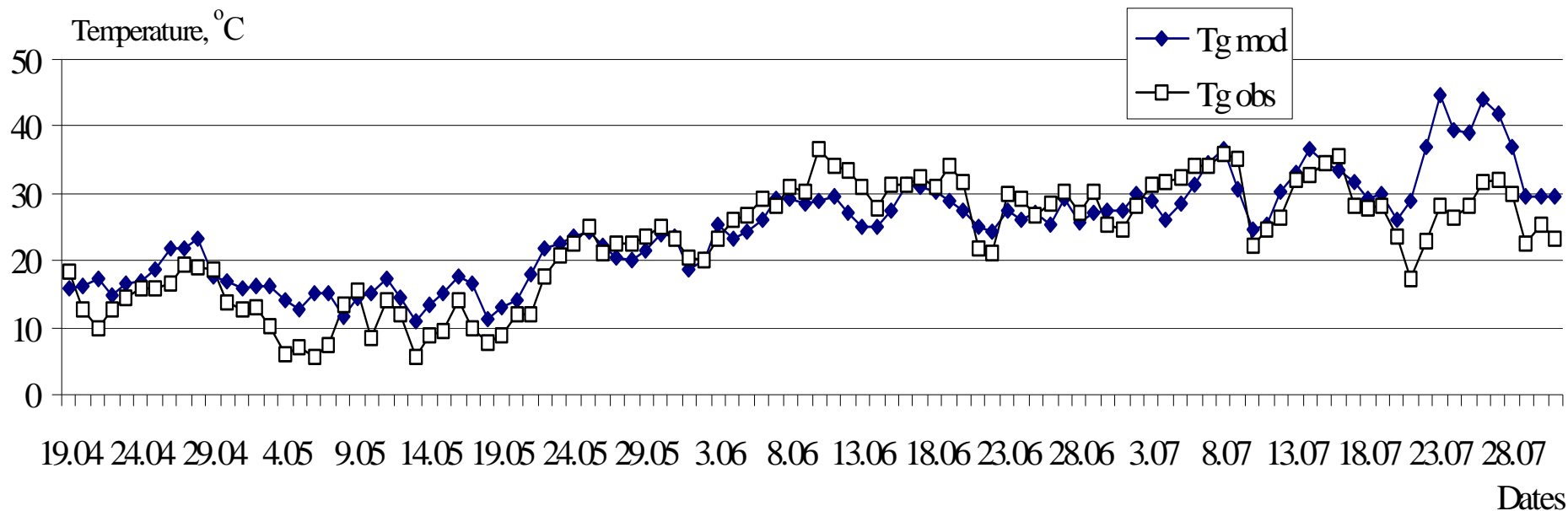
Расчитанные по модели и измеренные профили влажности почвы в процентах от сухого веса на участке с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.



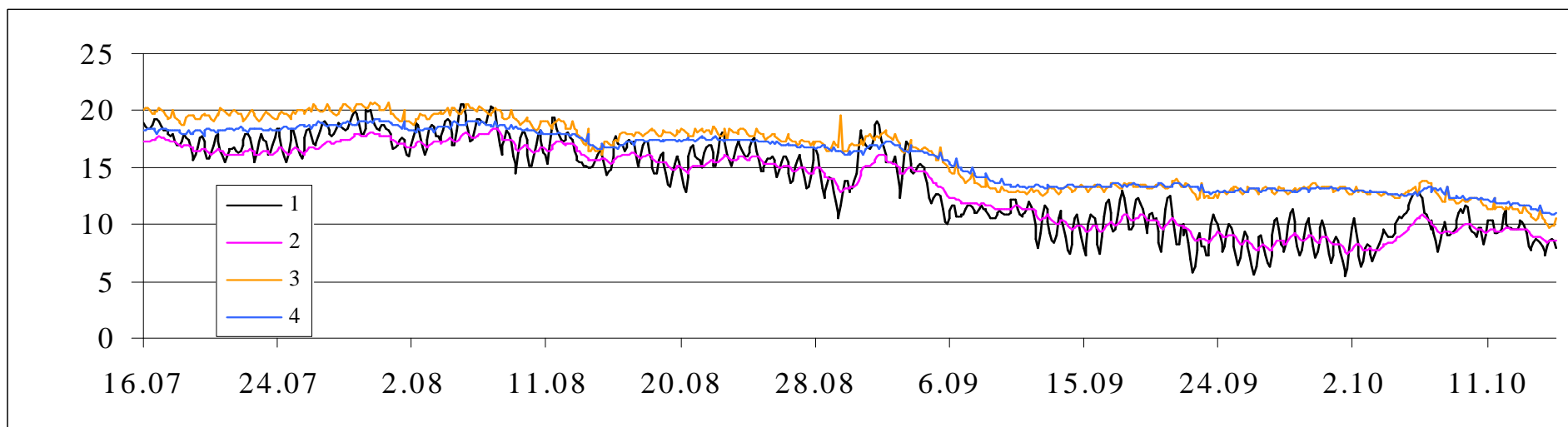
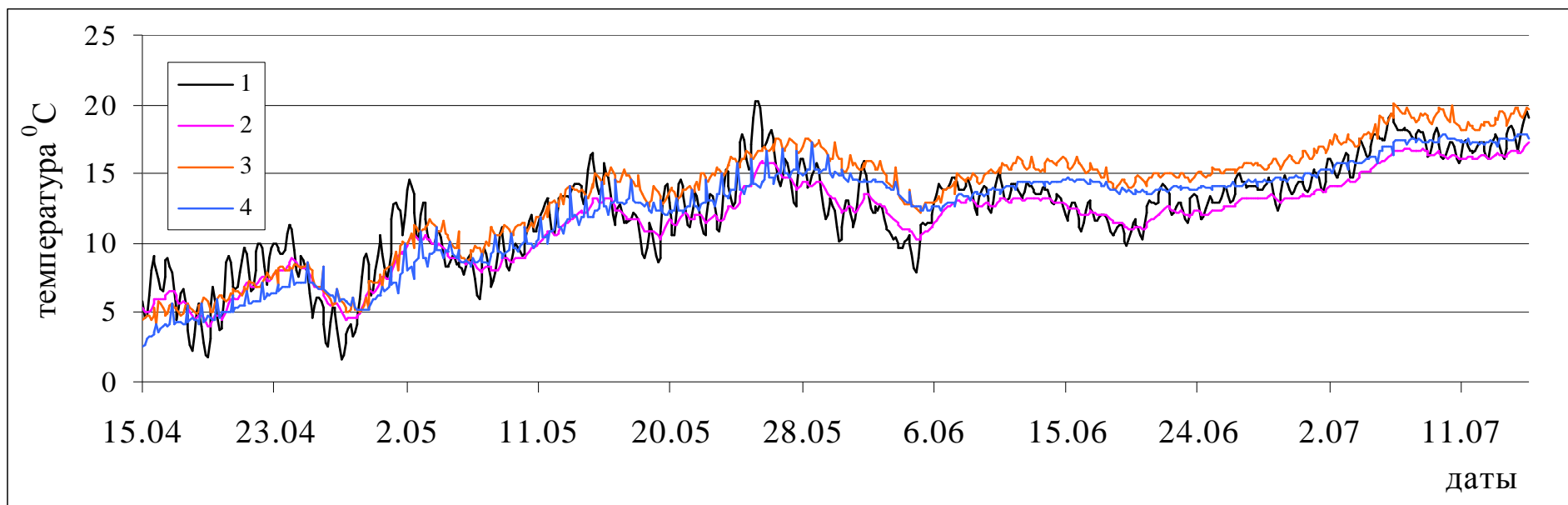
Временной ход влагосодержания метрового слоя почвы для шести агрометеостанций Курской модельной области для сезона вегетации 2003 г.



Рассчитанные по модели значения температуры листовой поверхности  $T_f$  и измеренные значения температуры воздуха  $T_a$  для участка с озимой пшеницей на агрометеостанции Петринка для сезона вегетации 1999 г.



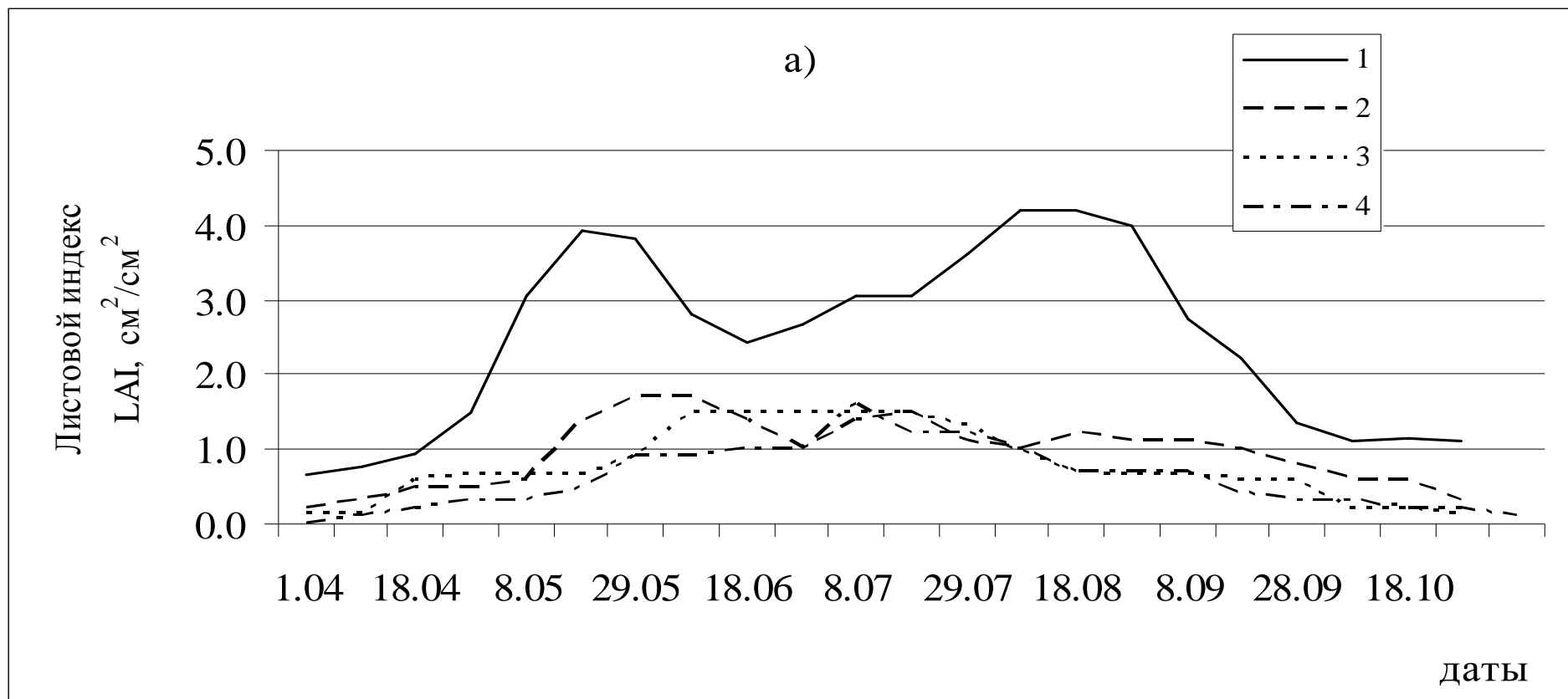
Рассчитанные по модели  $T_{g\ mod}$  и измеренные  $T_{g\ obs}$  значения температуры поверхности почвы для участка с озимой пшеницей на агрометеостанции Петринка для сезона вегетации 1999 г.



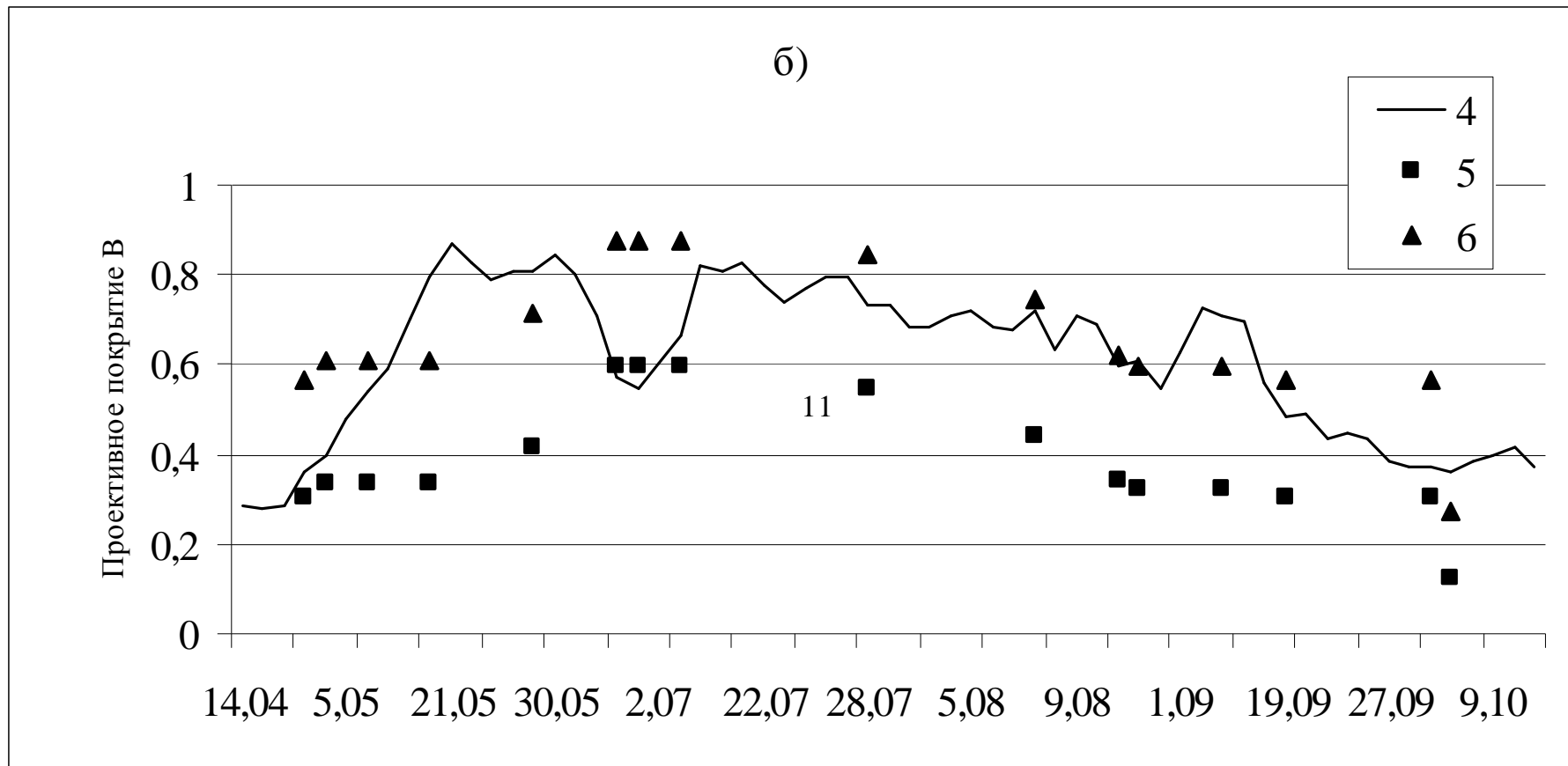
Температура почвы под растительным покровом, рассчитанная по модели для глубин 20 (1) и 40 (2) см, и измеренная на тех же глубинах (3) и (4) для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк. 2003 г.

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

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



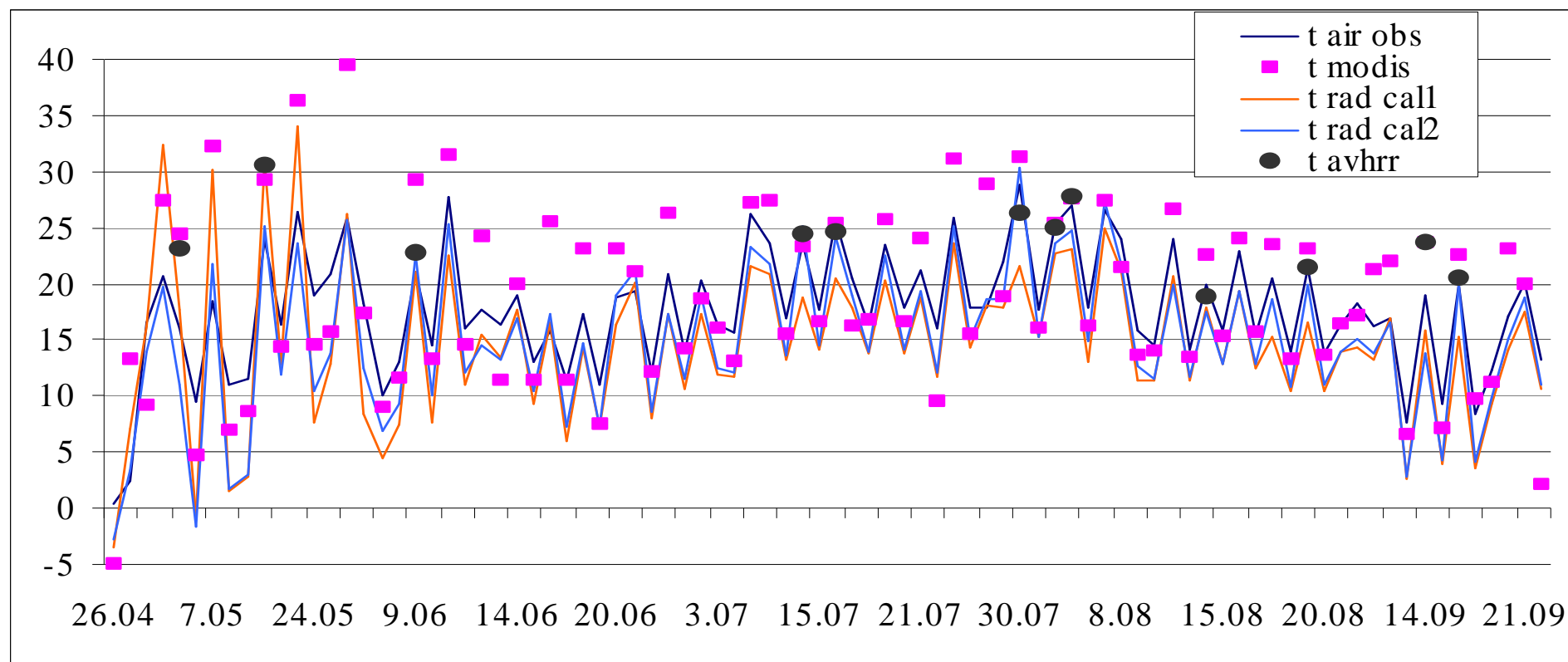
Временные ходы листового индекса LAI для сезона вегетации 2004 г., определённые по данным AVHRR/3 (1, 2), MODIS (4) и по данным наземных наблюдений (3) на воднобалансовой станции Нижнедевицк для зерновых (1) и травянистых (2, 3) культур



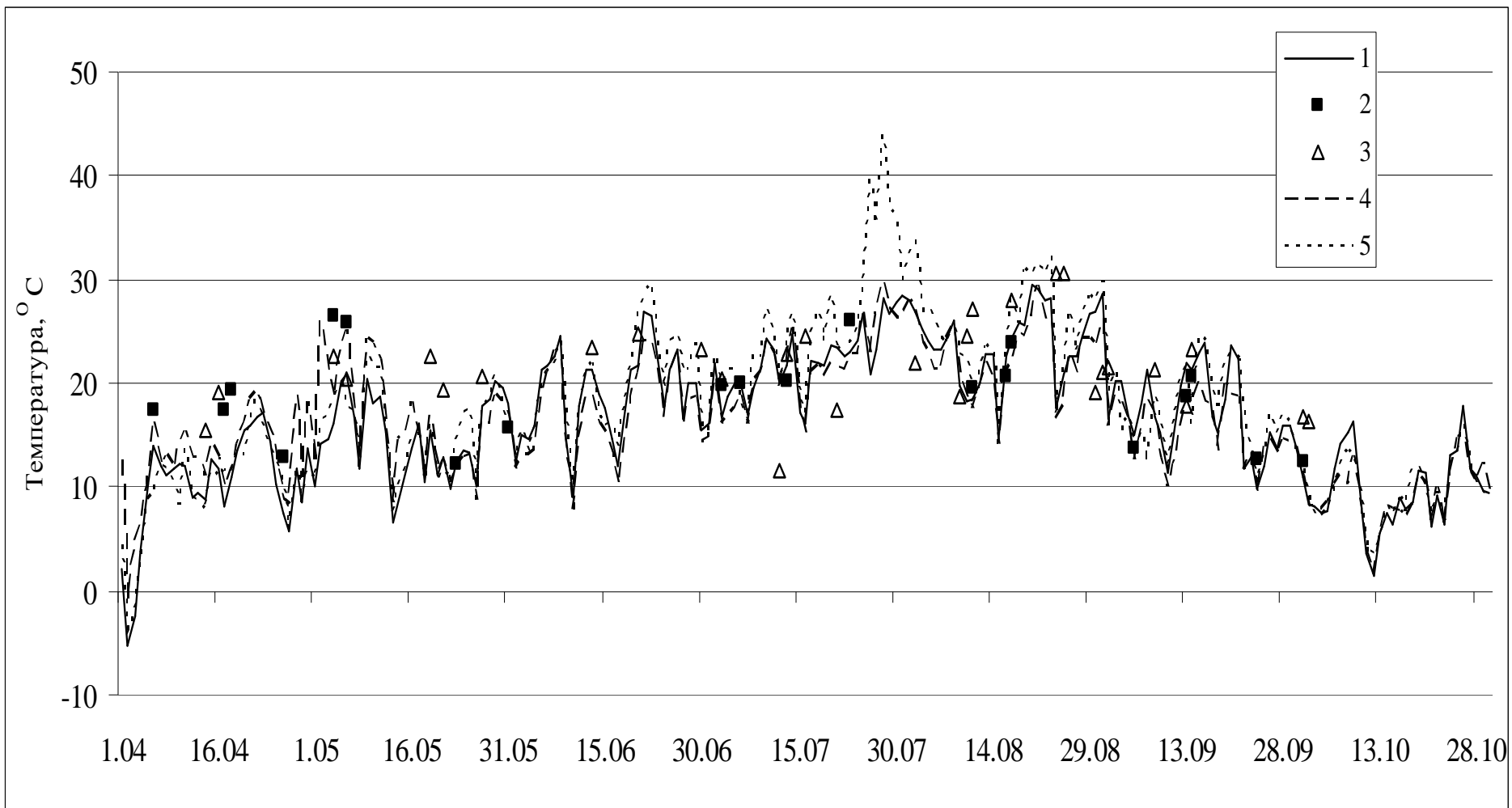
$$V = 1 - \exp(-p * LAI)$$

Временной ход проективного покрытия V (б) для сезона вегетации 2004 г., определённый по данным AVHRR/NOAA без выделения культур (4) и по данным наземных наблюдений на агрометеостанции Нижнедевицк для травянистых (5) и зерновых (6) культур.

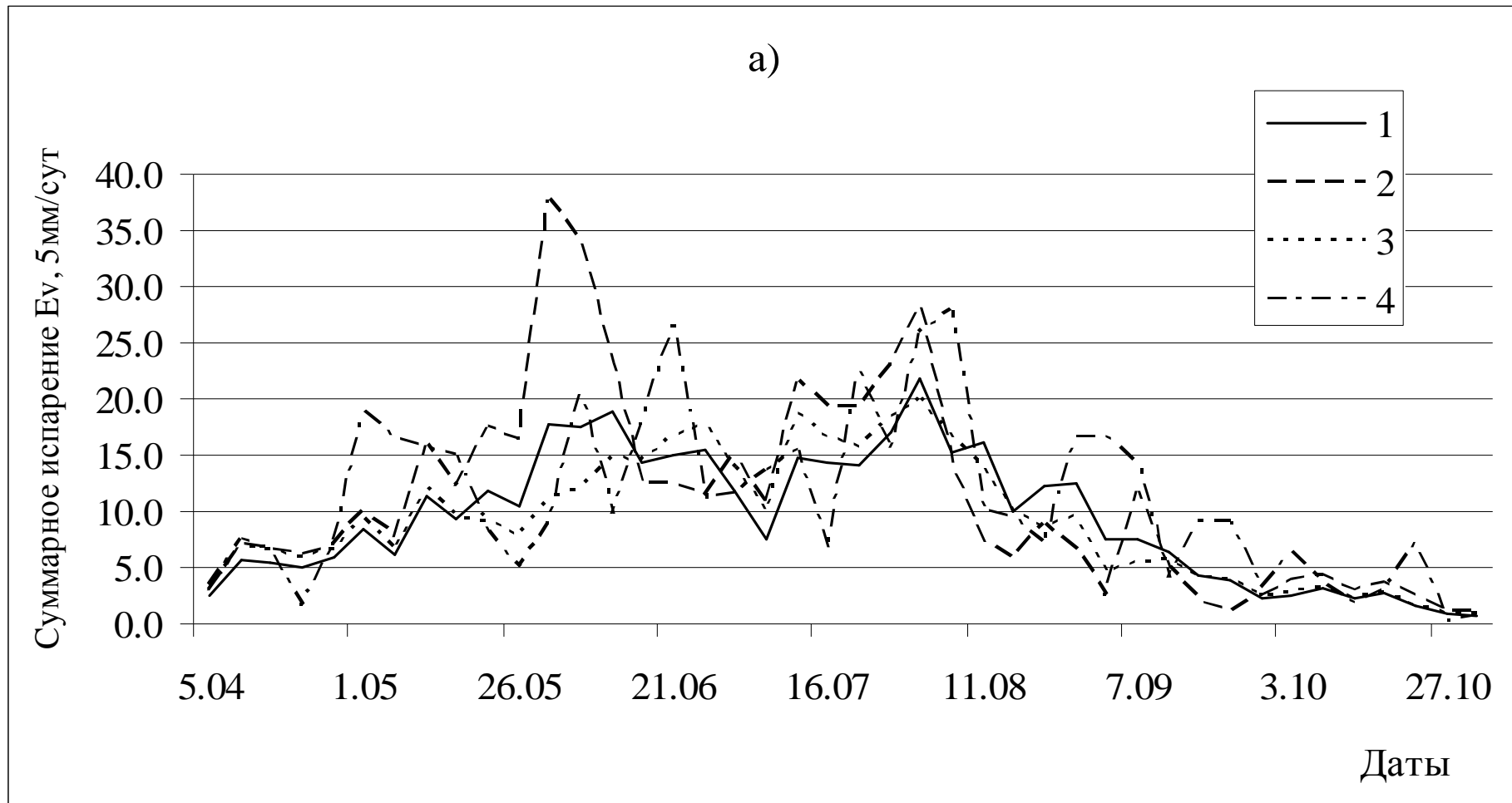
Значения радиационной температуры подстилающей поверхности, определенной по данным AVHRR/NOAA,  $T_{avhrr}$ , и MODIS/Terra,  $T_{modis}$  и рассчитанной по модели при использовании значений LAI и В, определенных по наземным и спутниковым данным,  $T_{rad\ call}$  и  $T_{rad\ cal2}$ .  $T_{air\ obs}$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



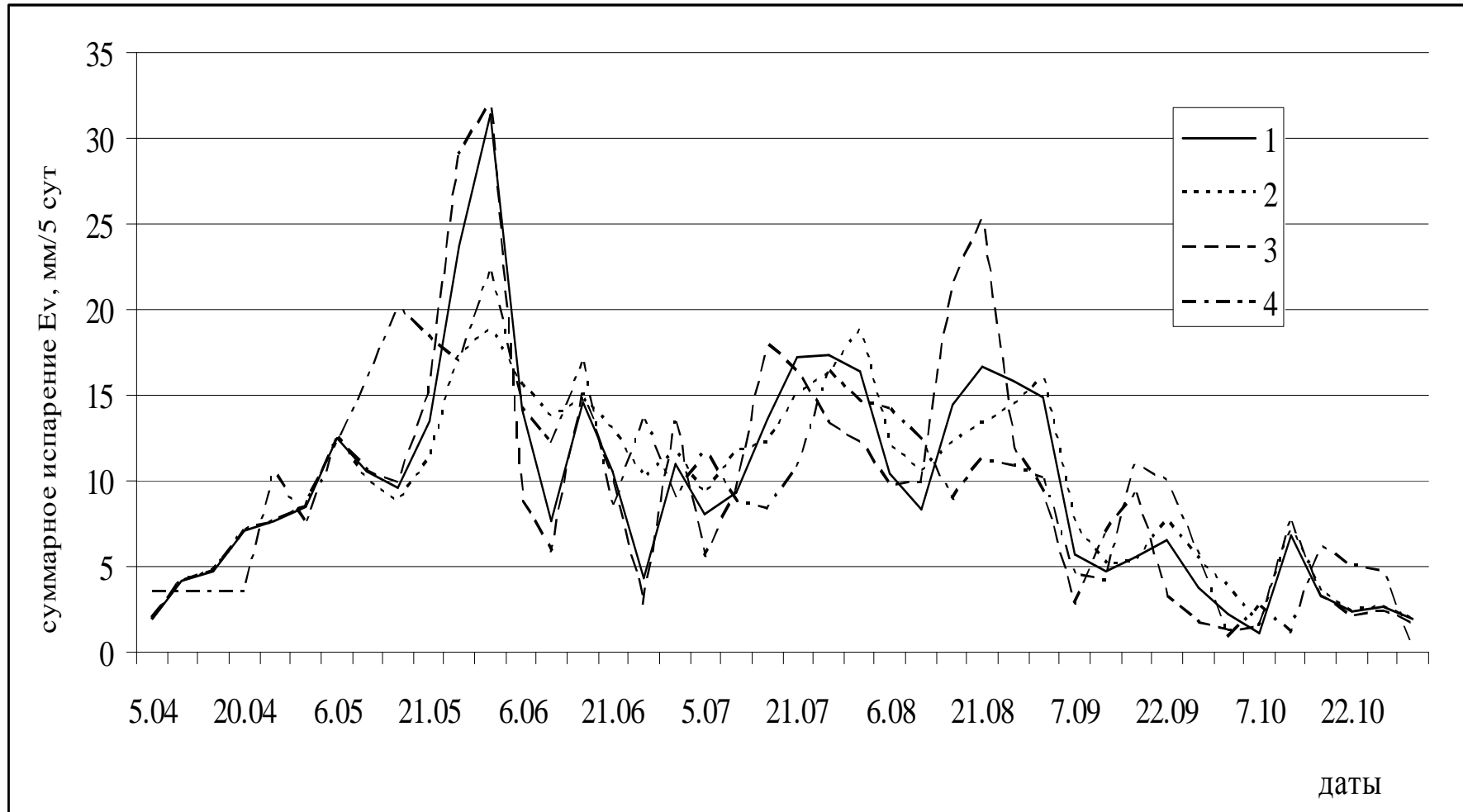




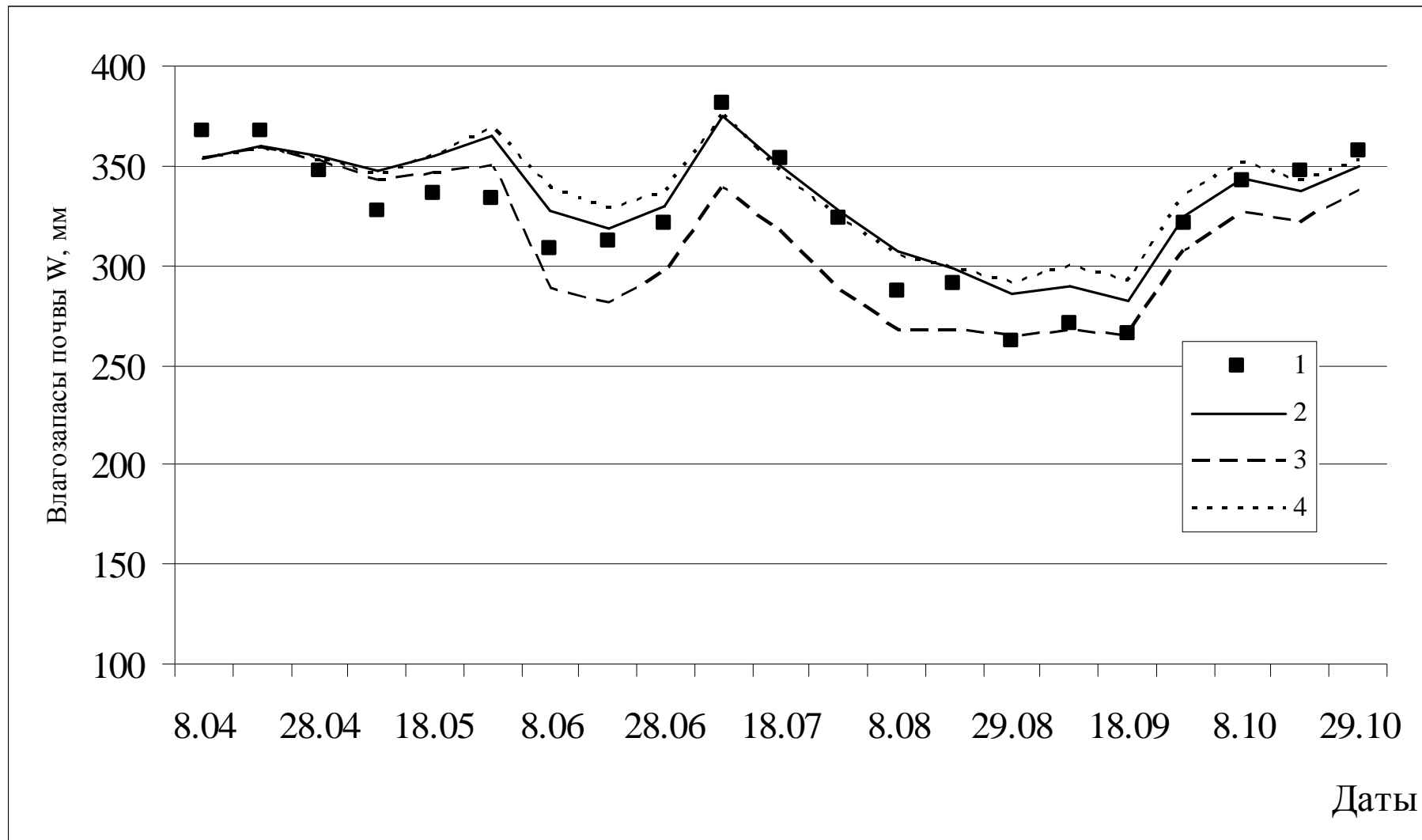
Временной ход температуры воздуха,  $T_a$ , над участком с многолетними травами (1), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности,  $T_{s,eff}$ , определённой по данным AVHRR/3 (2) и MODIS (3), и вычисленной по модели,  $T_s$ , при использовании оценок LAI по данным AVHRR/3 для зерновых культур (4) и MODIS (5) на агрометеостанции Курск для сезона вегетации 2004 г.



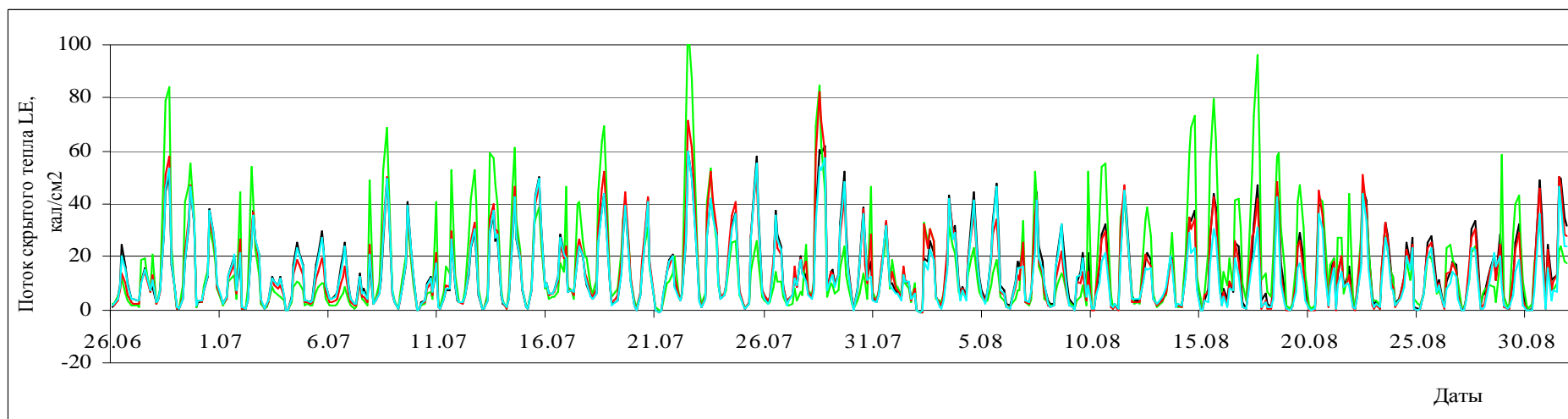
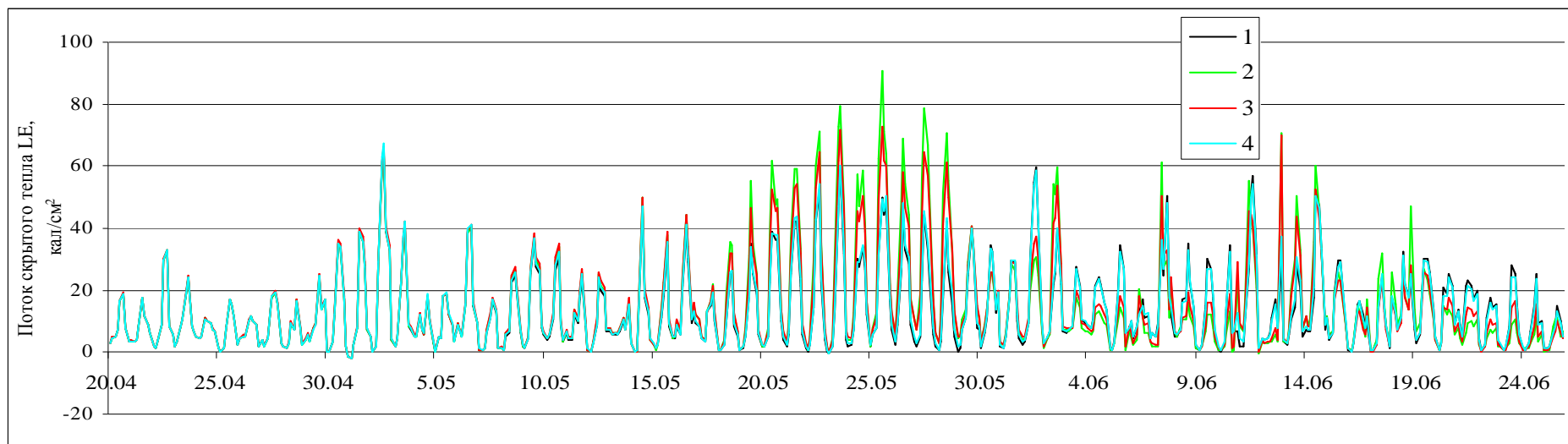
Значения суммарного испарения  $E_v$  для сезона вегетации 2004 г. (a), рассчитанного по модели при оценках LAI по данным AVHRR/NOAA для зерновых культур (1) и многолетних трав (2), по данным наземных измерений для многолетних трав (3). 4 – измеренные значения  $E_v$  для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк.



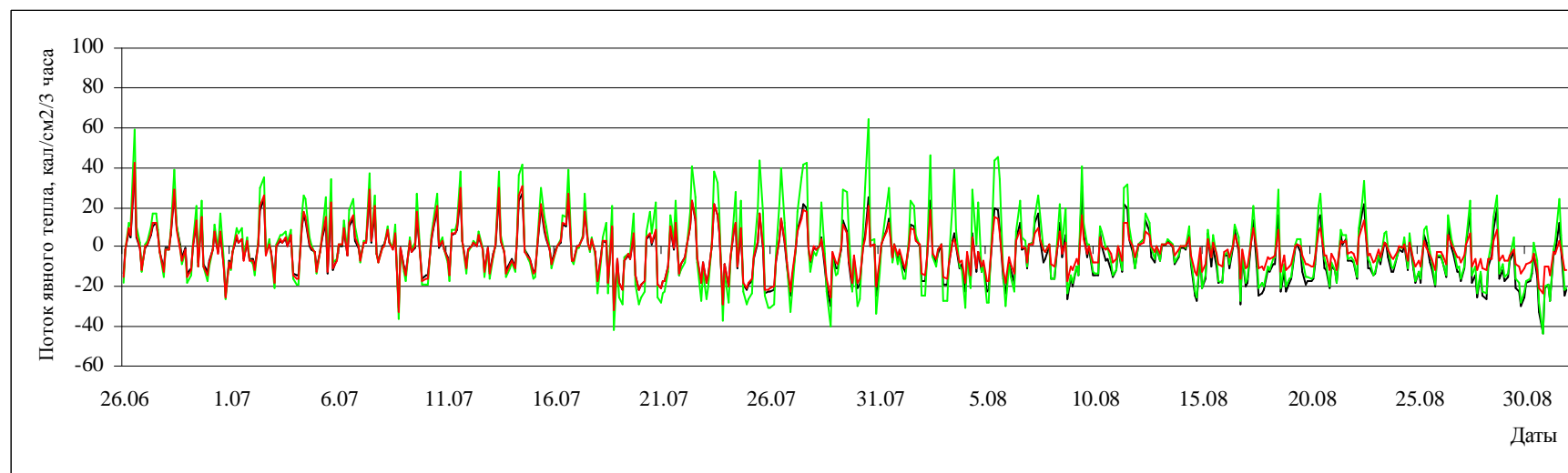
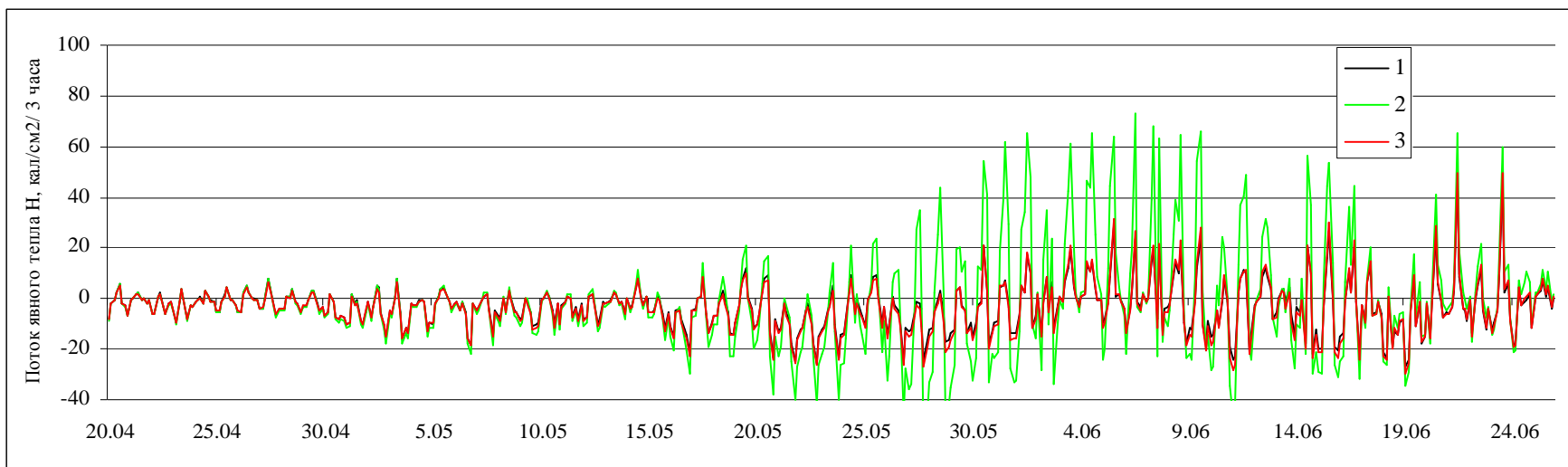
Значения суммарного испарения  $E_v$ , рассчитанного по модели при оценках LAI по данным MODIS/Terra (1) и по данным AVHRR/NOAA для зерновых культур (2) и многолетних трав (3). 4 – измеренные значения  $E_v$  для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2003 г.



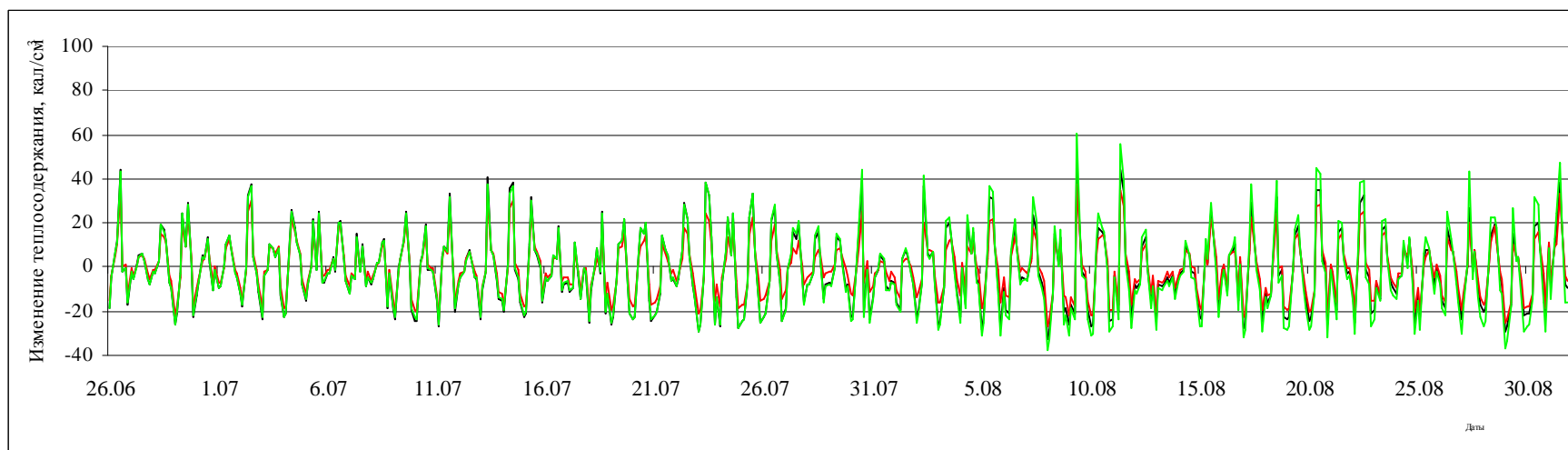
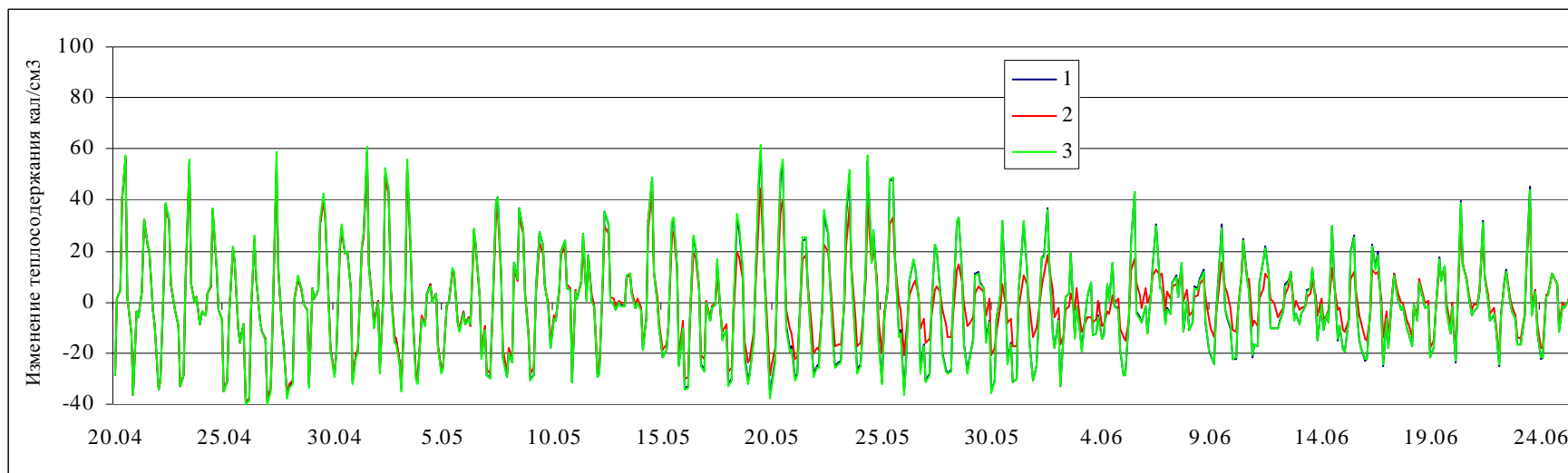
Временной ход влагозапасов почвы, измеренных (1) и рассчитанных по модели при оценке LAI и В по данным AVHRR/NOAA для многолетних трав (2) и зерновых культур (3) и по данным наземных измерений для многолетних трав (4) на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2004 г.



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.

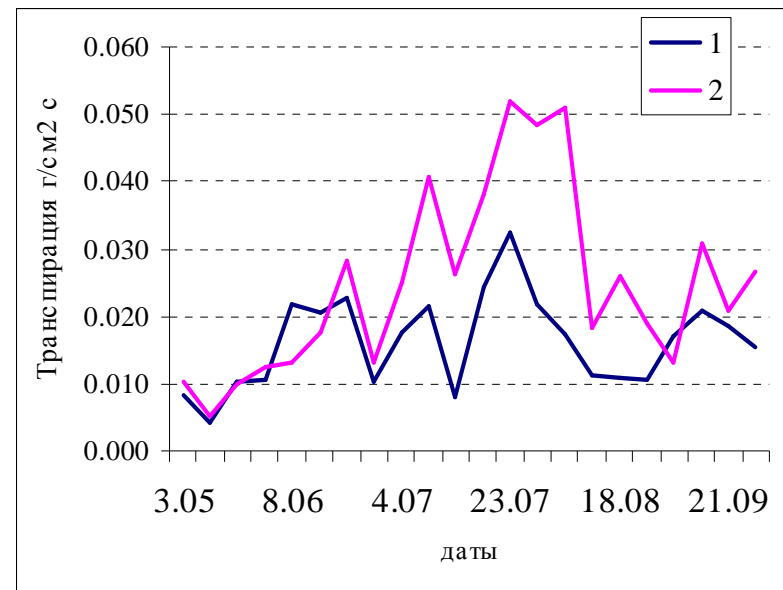
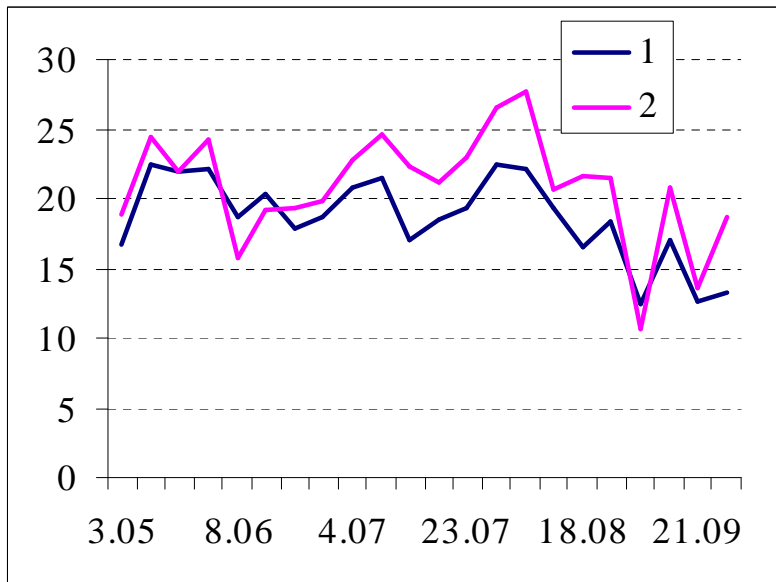


Поток явного тепла, рассчитанный по модели при оценке LAI по данным AVHRR (1), MODIS (2) и наземным данным (3) для участка с многолетними травами. Агростанция Нижнедевицк, 2003 г.



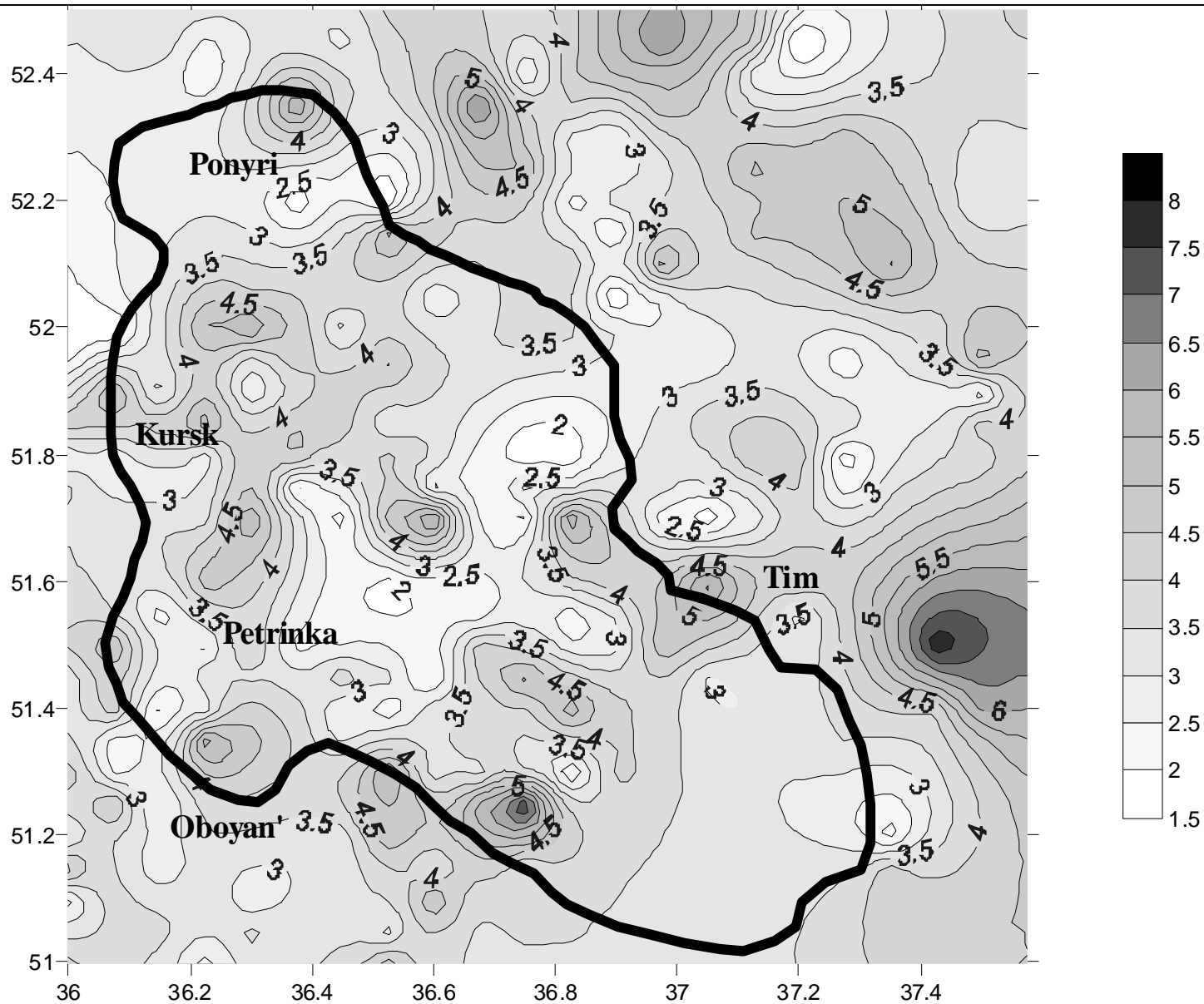
Теплосодержание метрового слоя почвы, рассчитанное по модели при оценке LAI по данным AVHRR (1), MODIS (2) и наземным данным (3) для участка с многолетними травами. Агростанция Нижнедевицк, 2003 г.

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.

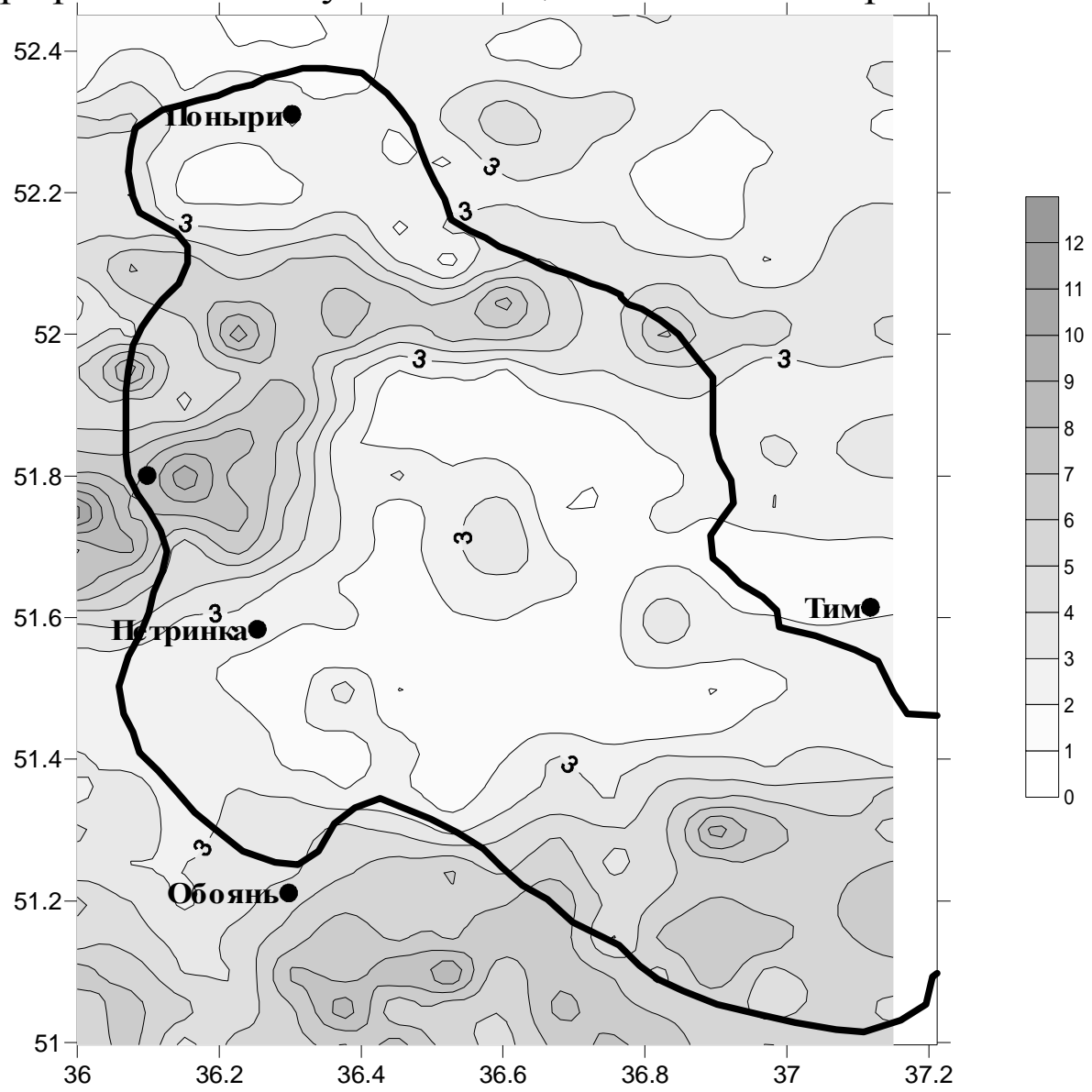




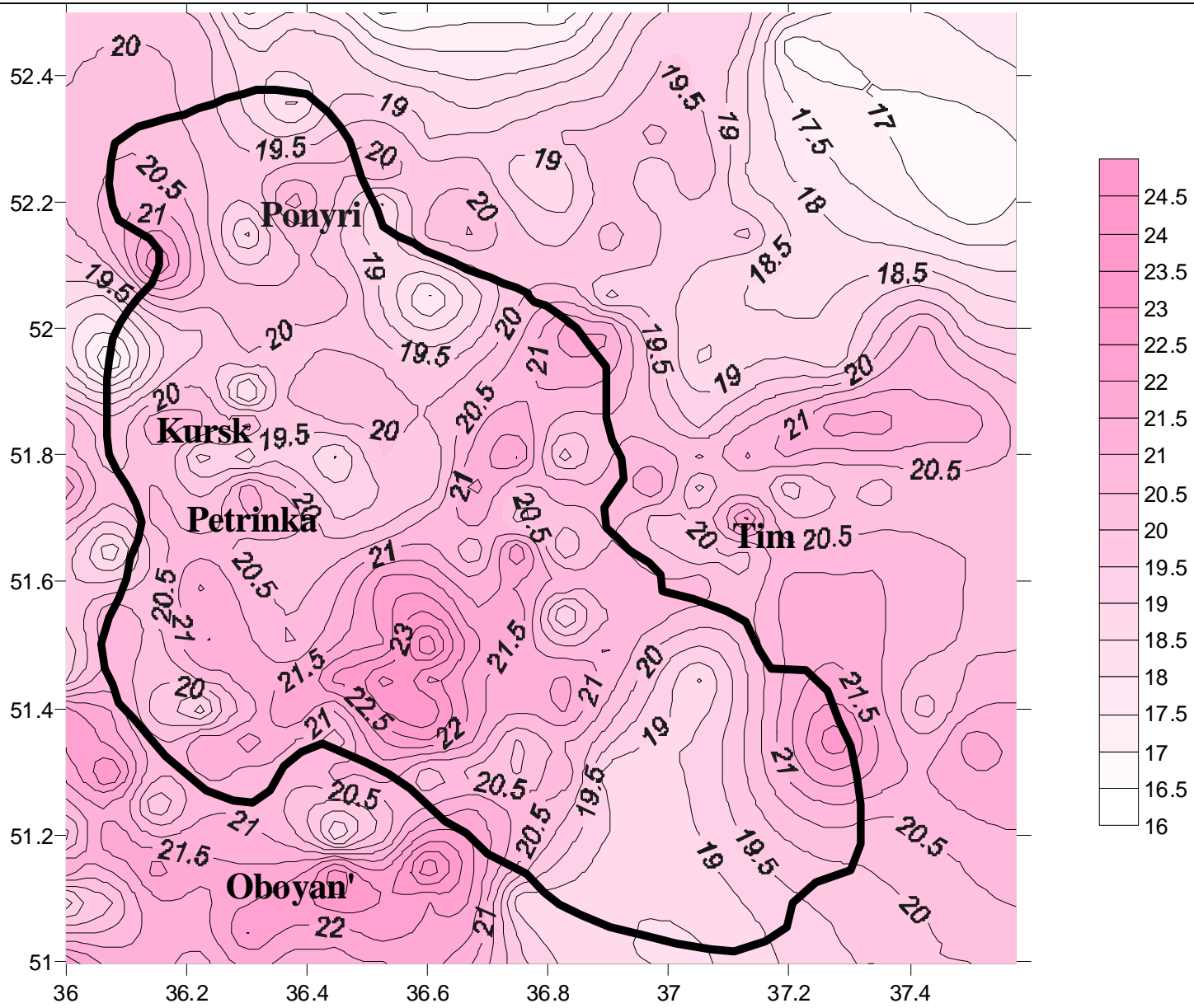
Распределение листового индекса LAI, определенного по данным AVHRR, по площади водосбора р.Сейм. 23 июня 2004 г., 15 ч. местного времени.



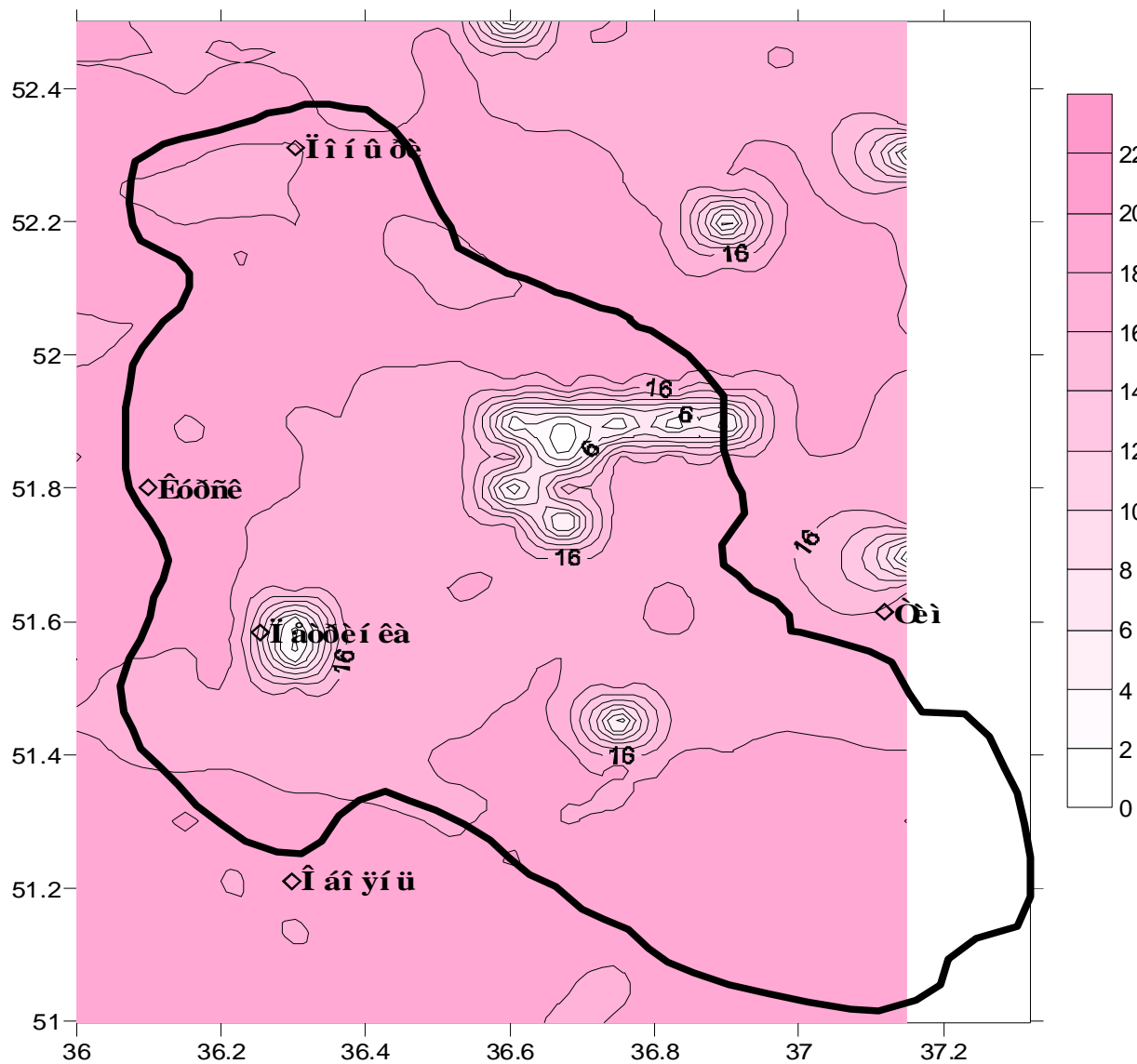
Распределение листового индекса *LAI*, определенного по данным AVHRR/NOAA, по площади водосбора р.Сейм. 23 августа 2005 г., 15 ч. местного времени



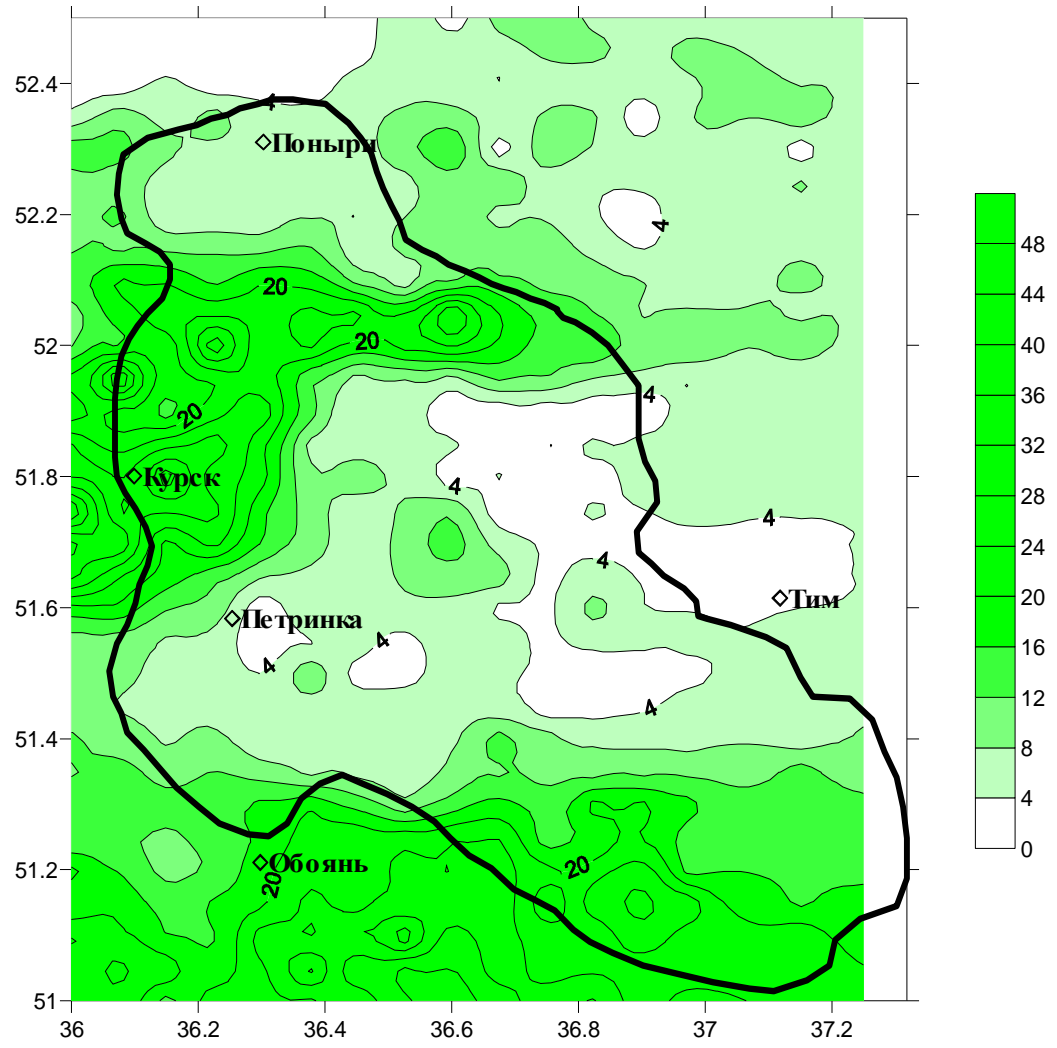
Распределение температуры растительного покрова, определенной по данным AVHRR, по площади водосбора р.Сейм. 23 июня 2004 г., 15 ч. местного времени.



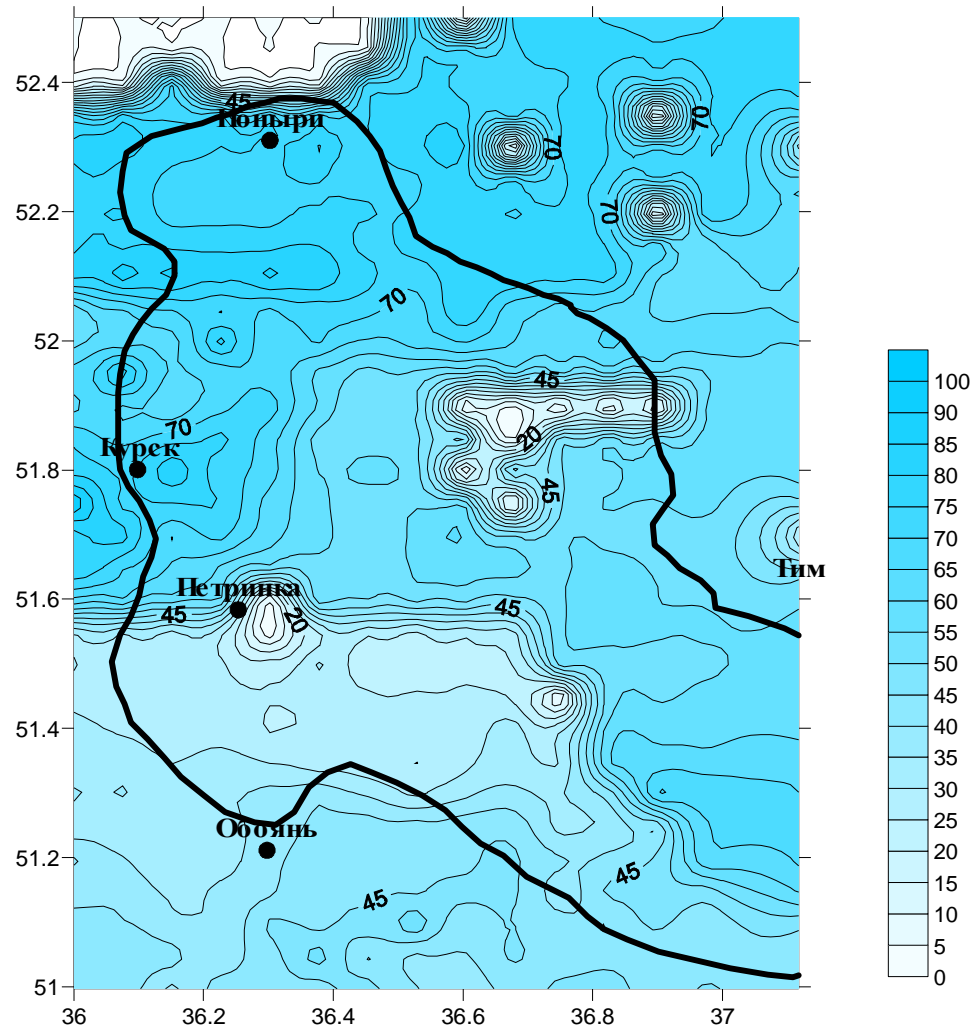
Распределение по площади водосбора р.Сейм температуры подстилающей поверхности, определенной по данным AVHRR/NOAA для каждого узла вычислительной сетки. 23 августа 2005 г., 15 ч. местного времени

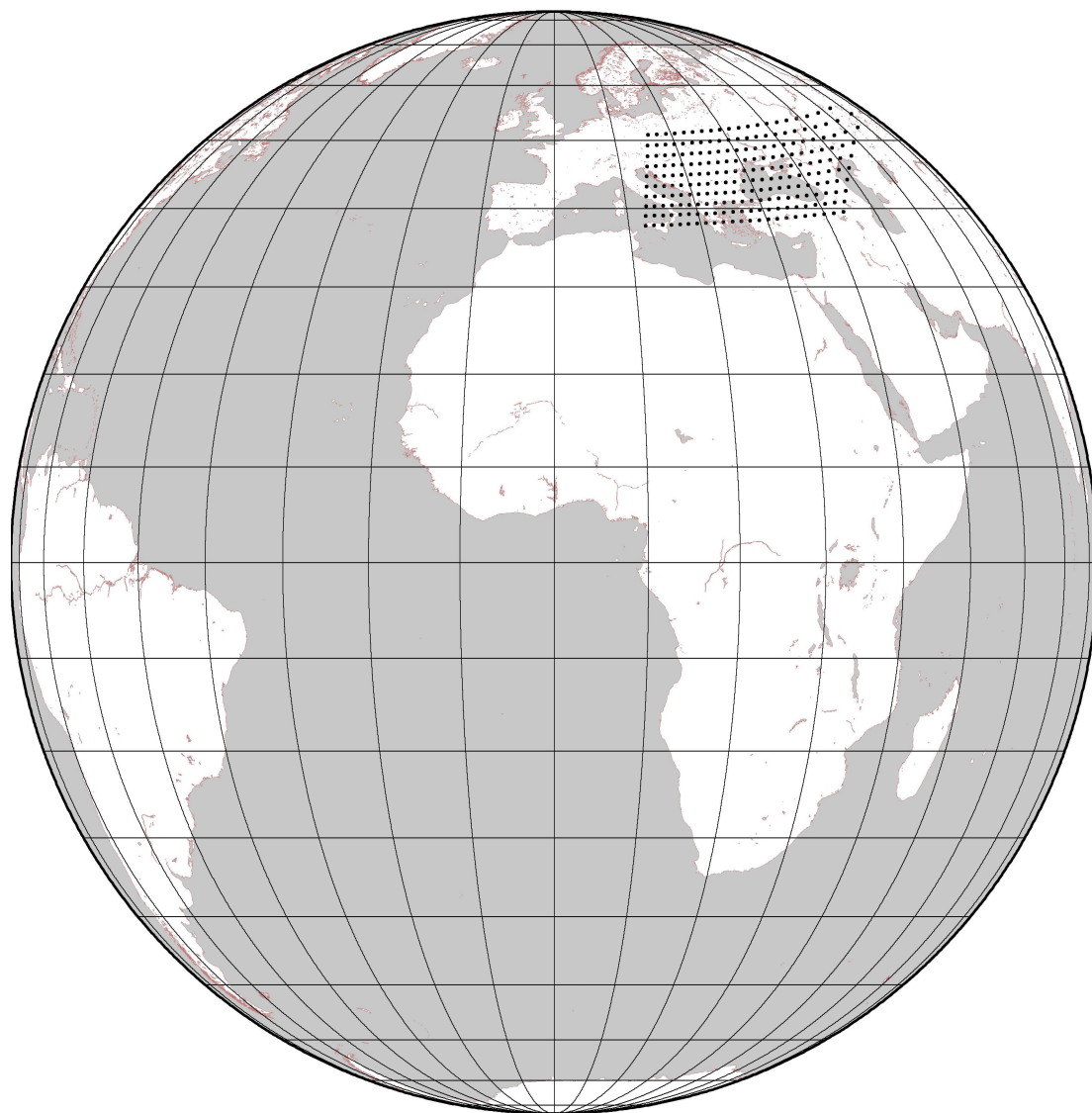


Распределение по площади водосбора р.Сейм транспирации растительного покрова, рассчитанной по модели при использовании спутниковых оценок *LAI* и *Ta* для каждого узла вычислительной сетки. 23 августа 2005 г., 15 ч. местного времени

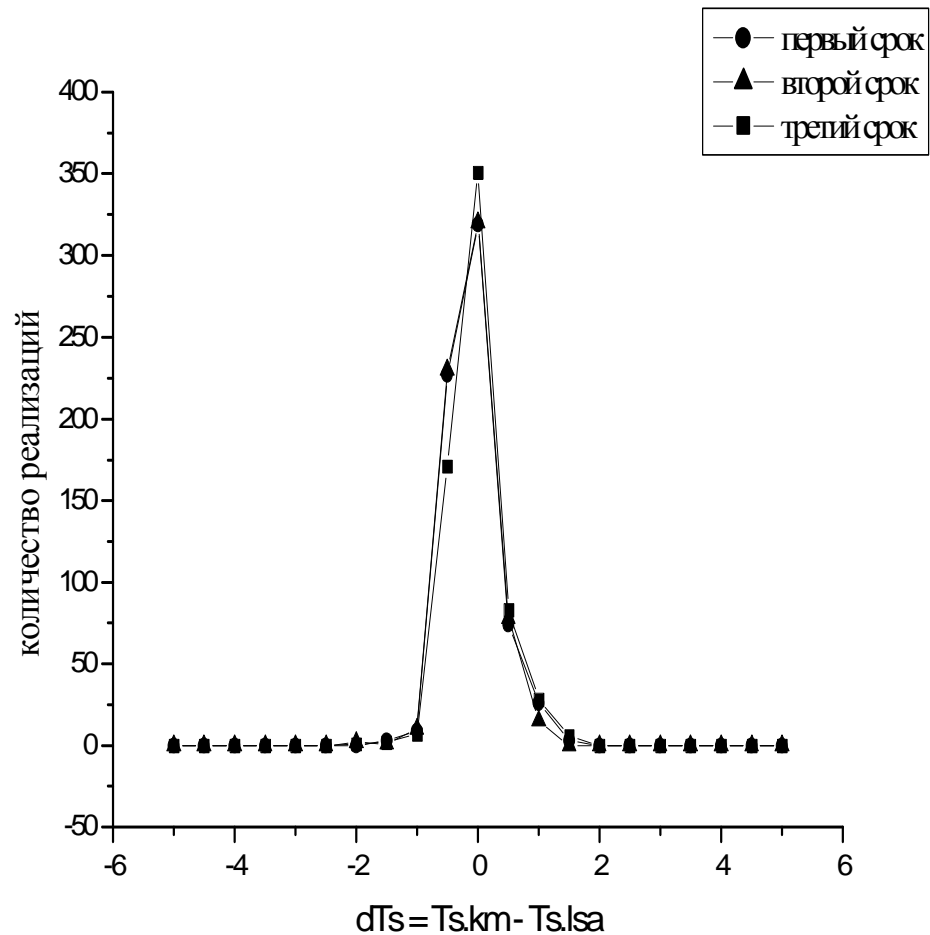


Распределение по площади водосбора р.Сейм величин суммарного испарения, рассчитанного по модели при использовании спутниковых оценок  $LAI$  и  $Ta$  для каждого узла вычислительной сетки. 23 августа 2005 г., 15 ч. местного времени





Территория, охватываемая измерениями SEVIRI/Meteosat-9



Гистограммы распределения разностей  $dT_s = T_{s.km} - T_{s.lsa}$  для региона 2 и трех сроков (11 ч, 12ч, 13ч) за 11 сентября 2008 г.

первый срок, число реализаций= 661 смещение= 0.089, СКО= 0.408

второй срок, число реализаций= 656, смещение= -0.123, СКО= 0.393

третий срок, число реализаций= 649, смещение= -0.031, СКО= 0.398



## Основными результатами настоящей работы можно считать:

- 1) предложенные методы тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra для оценки температур поверхности растительного покрова  $T_a$ , поверхности почвы  $T_g$ , радиационной температуры подстилающей поверхности  $T_{s.eff}$ , листового индекса LAI и проективного покрытия растительностью  $B$ ;
- 2) адаптированную к спутниковым оценкам названных величин физико-математическую модель SVAT, предназначенную 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. В рамках этого направления установлена возможность замены данных наземных наблюдений при задании временного хода LAI и  $B$ , используемых в качестве параметров модели, а также температур  $T_a$ ,  $T_g$  и  $T_{s.eff}$  на спутниковые оценки этих величин, подтвержденная результатами сравнения значений спутниковых и модельных радиационных и термодинамических температур, а также влагосодержания почвы и суммарного испарения. Полученные небольшие расхождения спутниковых и модельных оценок этих температур, не превышавшие величин погрешности их определения по спутниковой информации, позволили использовать в модели SVAT результаты оценки температур, LAI и  $B$  по спутниковым данным для расчета компонент водного и теплового балансов речного водосбора.