

Дистанционное определение характеристик
подстилающей поверхности по данным сканирующих
радиометров спутников NOAA и EOS/Terra при
моделировании вертикальных потоков влаги и тепла с
речных водосборов

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

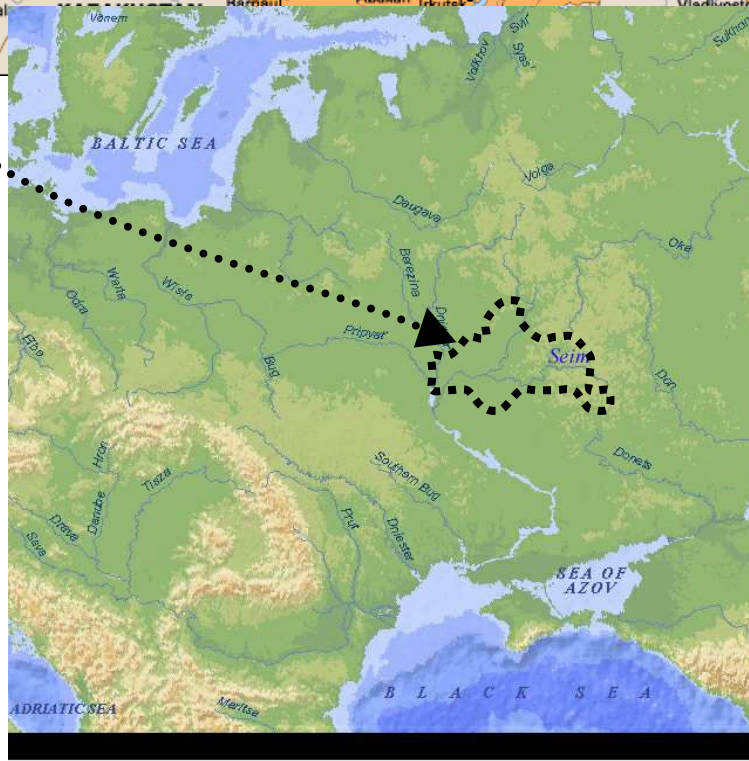
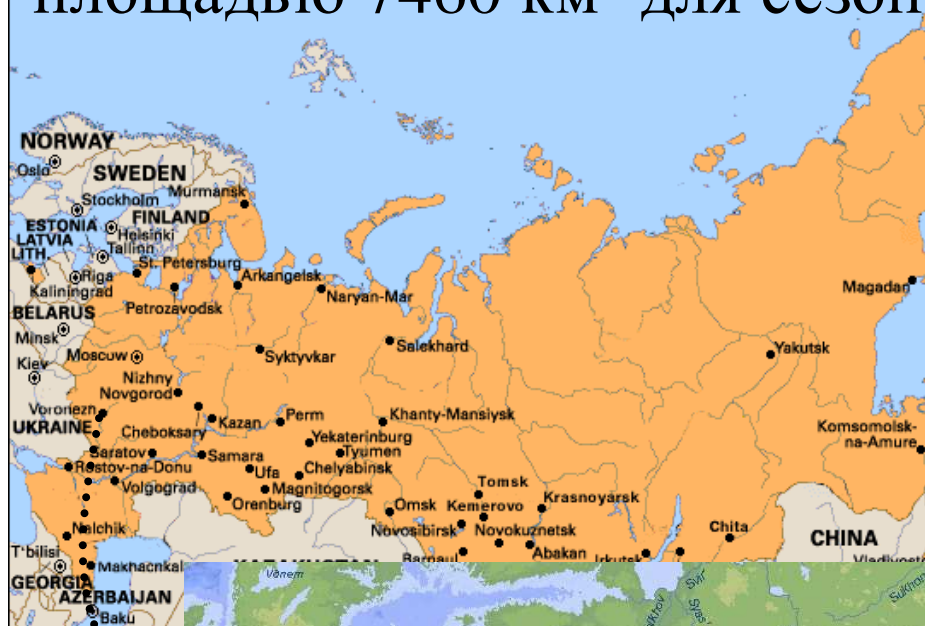
¹ Институт водных проблем РАН, г. Москва

² 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 для дистанционного определения температуры T_g и излучательной способности ε 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 V с целью их использования в модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе "почва-растительность-атмосфера" (SVAT);
- разработка способов усвоения в модели полученных по спутниковым данным оценок названных характеристик для ее калибровки и верификации и проведения расчетов вертикальных потоков тепла и влаги и других составляющих водного и теплового балансов для речных водосборов

Исследования проводились на примере находящегося в лесостепной зоне центральной части России водосбора р.Сейм (Курская обл.) площадью 7460 км² для сезонов вегетации 1997, 1999-2004 гг.



Метод определения температуры T_g и излучательной способности ε 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 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) 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

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

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

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

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

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

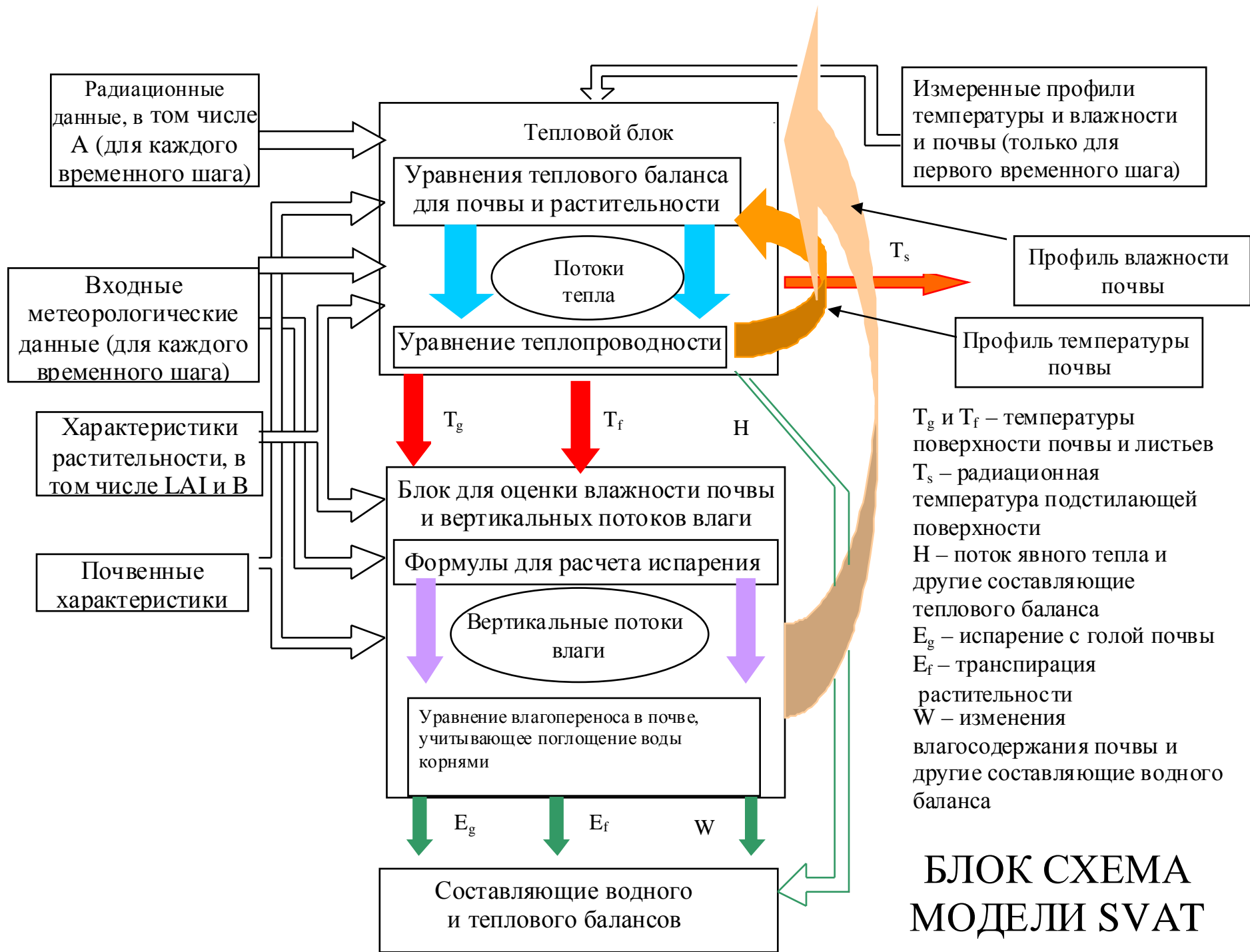
A_1 , A_2 – значения альбедо, измеренные в 1-ом и 2-ом каналах радиометра AVHRR

Для разработки методов анализа спутниковых данных был создан архив синхронных спутниковых и наземных наблюдений за периоды вегетации 1997, 1999-2004 гг., который содержал данные измерений радиометров AVHRR ИСЗ NOAA-12, -14, -16, -17 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 $\approx 5 \times 7 \text{ км}^2$. 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. Спутниковые оценки характеристик подстилающей поверхности и статистика ошибок определения T_a , $T_{s.eff}$ и T_{sg} для сезона вегетации 2001 г.

Агрометеостанция	Количество изображений	NDVI	В	T_a			$T_{s.eff}$			T_{sg}		
				Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто	Смщ	Ско	Сто
Курск	21	0,292	0,38	-0,70	1,48	1,30	-0,14	2,58	2,58	0,34	4,26	4,25
Обоянь	25	0,309	0,42	-1,17	2,03	1,66	-1,75	3,10	2,56	-2,41	4,42	3,71
Поныри	18	0,276	0,35	0,54	2,04	1,97	0,47	2,69	2,65	0,39	3,52	3,50
Тим	17	0,319	0,44	0,85	1,71	1,49	1,29	3,25	2,98	1,52	4,84	4,60
Нижедевицк	15	0,317	0,43	-0,29	1,72	1,69	-1,63	3,04	2,56	-3,03	4,77	3,69
Σ	96	0,303	0,40	-0,25	1,80	1,79	-0,42	2,93	2,89	-0,98	4,34	4,29

Средние квадратические отклонения (ско) для T_a , T_{sg} и $T_{s.eff}$ заключены в пределах 1.5-2.0, 3.5-4.8 и 2.0-3.2°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 + 60°C) локальным перегревом поверхности почвы, разницей до полутора часов между спутниковыми и наземными наблюдениями и генерализацией спутниковых данных.



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

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

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

Водный потенциал листвы

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

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

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

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

Аэродинамическое сопротивление

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

Уравнение теплового баланса для верхнего слоя почвы

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

Уравнение теплового баланса для растительного покрова

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

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 теплопроводности для почвы

Верхнее граничное
условие

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

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

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

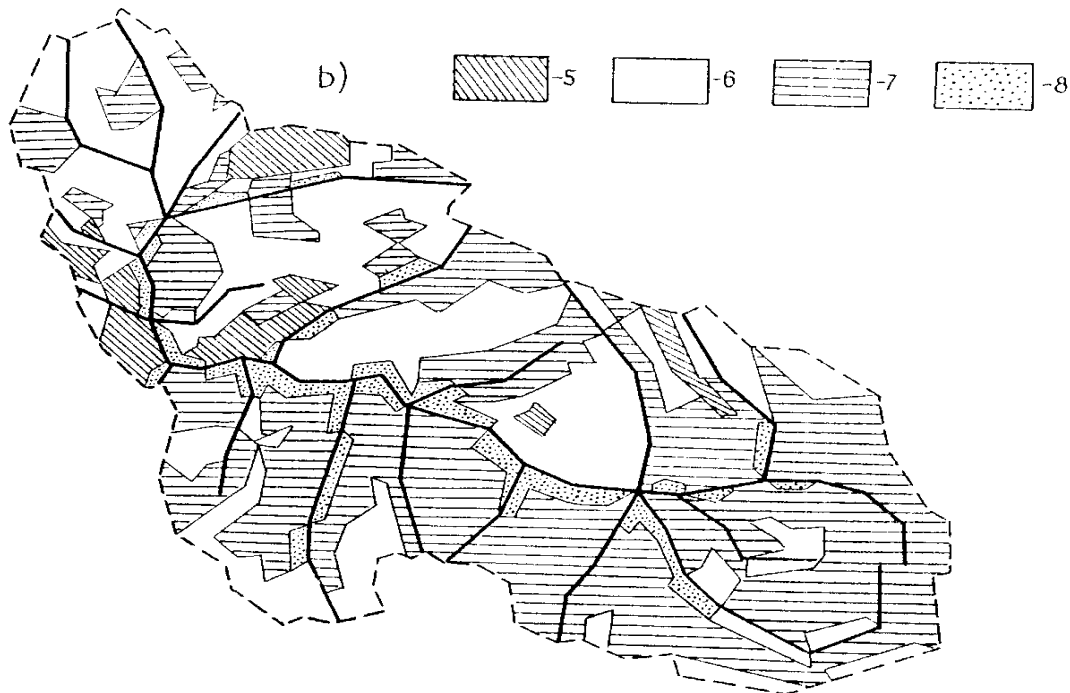
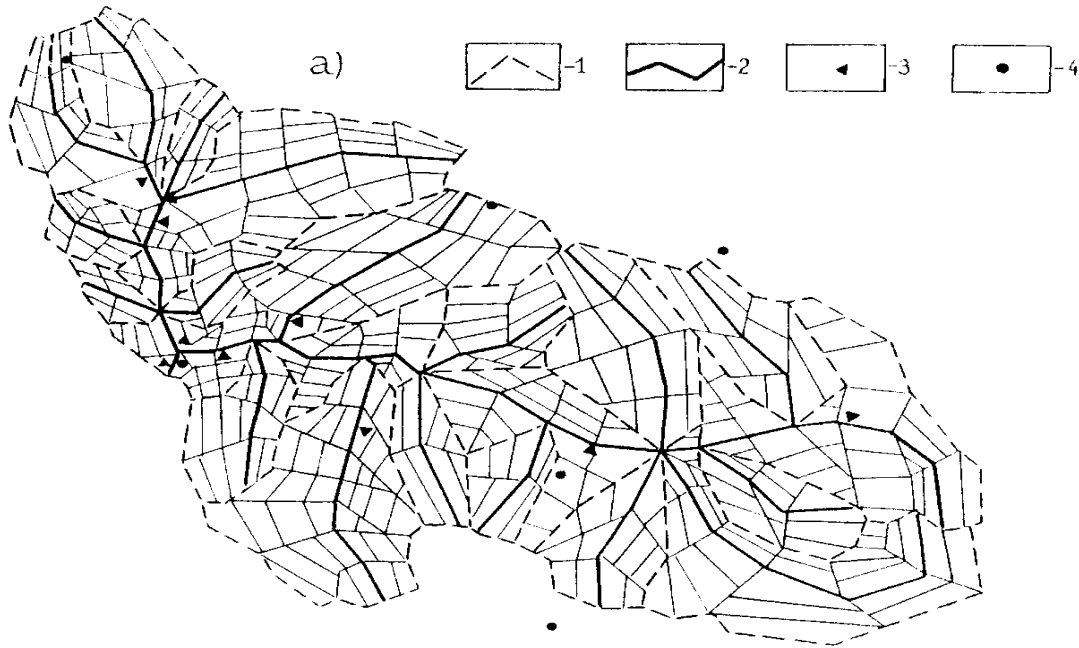
$$R_a = \left[N_{cl} + (1 - N_{cl}) k_2 q_a^{0.08} \right] \sigma T_a^4$$

N_{cl} - общая облачность
в долях единицы

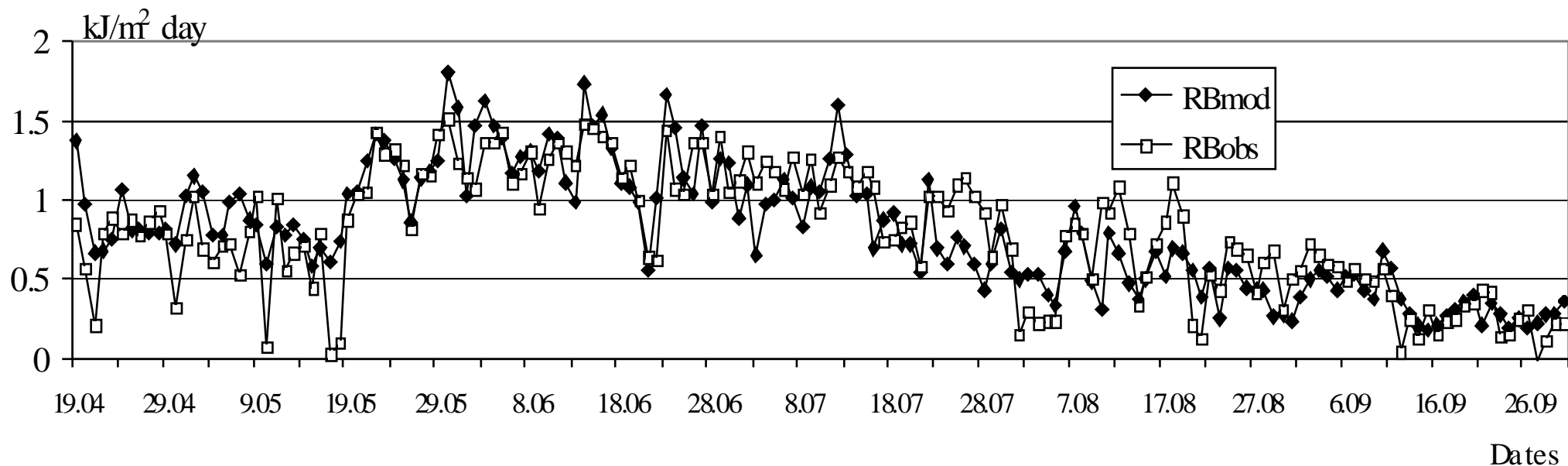
Входными переменными модели являются температура, влажность и давление воздуха, осадки, облачность, скорость ветра, суммарная радиация, значения которых получают с помощью стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

Пространственная неоднородность подстилающей поверхности учитывается в модели путем конечно-элементной схематизации водосбора при задании для каждого элемента значений параметров рельефа, почвенно-гидрологических характеристик, в том числе коэффициента фильтрации, объемного веса, пористости, максимальной гигроскопичности, наименьшей полевой влагоемкости, а также характеристик растительности – минимального устьичного сопротивления, LAI, коэффициента шероховатости (зависящего от высоты растений). Значения суммарного испарения и других составляющих водного баланса для всего водосбора вычисляются как средневзвешенные с учетом размеров площадей, занятых каждым видом растительности для каждого из типов почв.

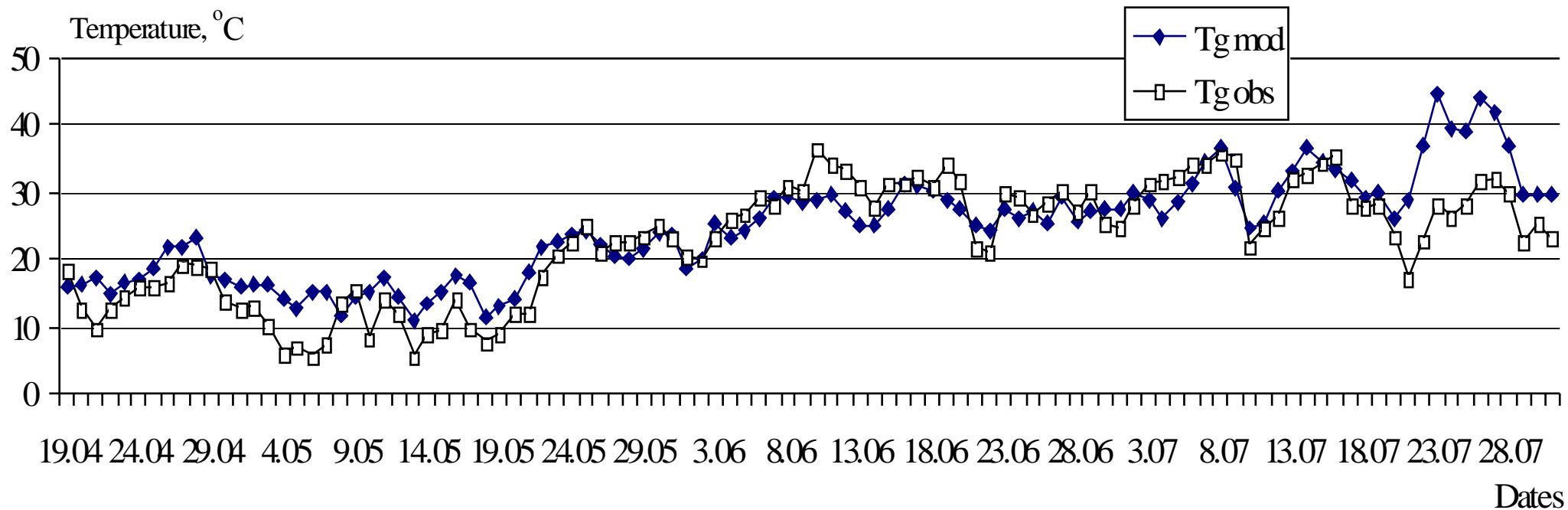
Конечно-элементная схематизация водосбора р.Сейм (а) и распределение почв на водосборе (b)



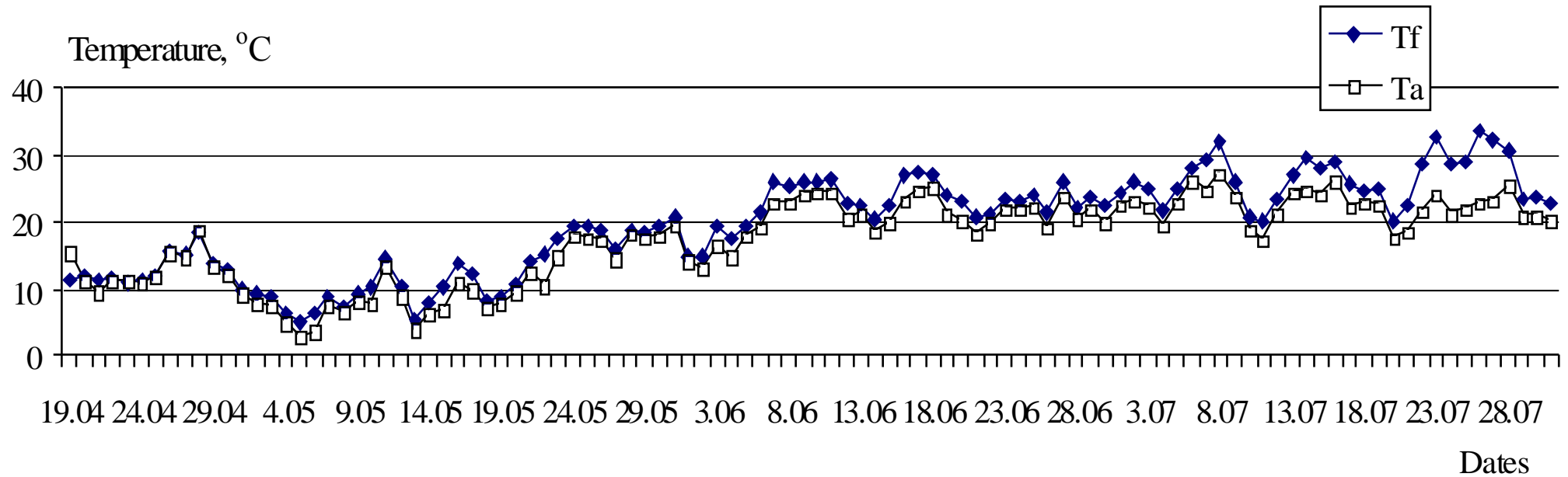
- 1-границы частных водосборов;
- 2-русловая сеть;
- 3-гидрометрические посты;
- 4-агрометеорологические станции;
- 5-8 – типы почв:
 - 5-серые лесные почвы,
 - 6-оподзоленные и выщелоченные черноземы,
 - 7-типичные и тучные черноземы
 - 8-пойменно-луговые почвы



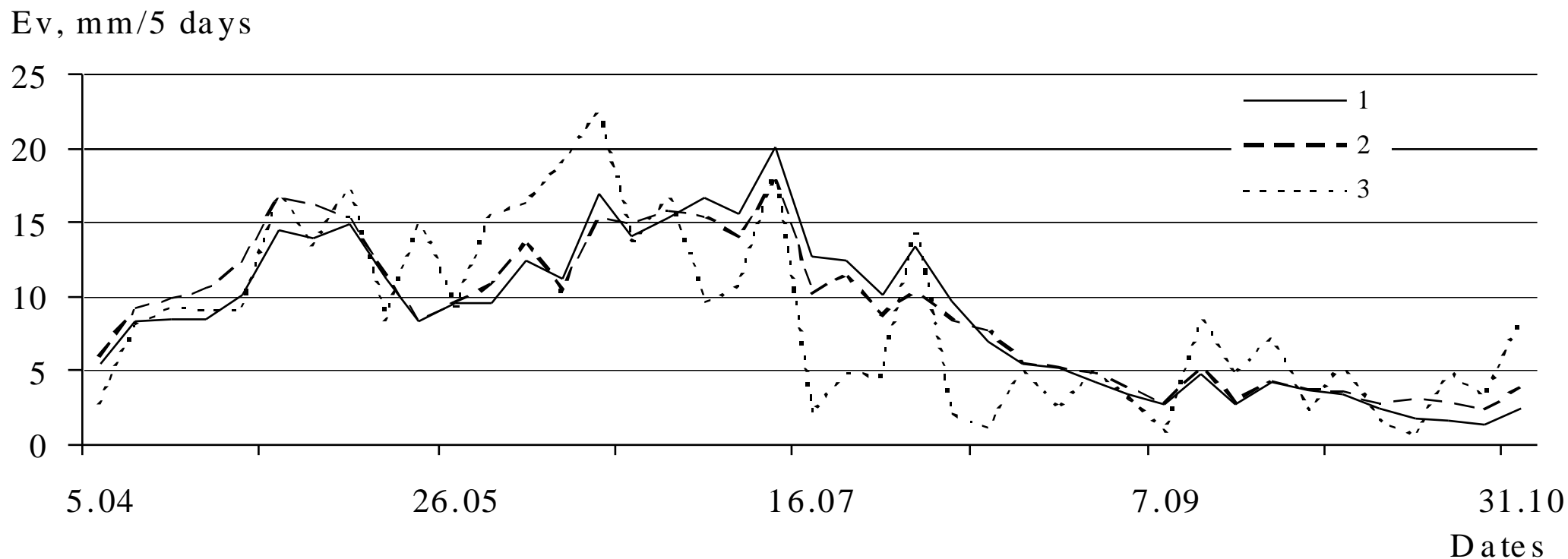
Рассчитанные по модели RB_{mod} и измеренные RB_{obs} значения радиационного баланса для участка с озимой пшеницей на агрометеостанции Петринка для сезона вегетации 1999 г.



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.

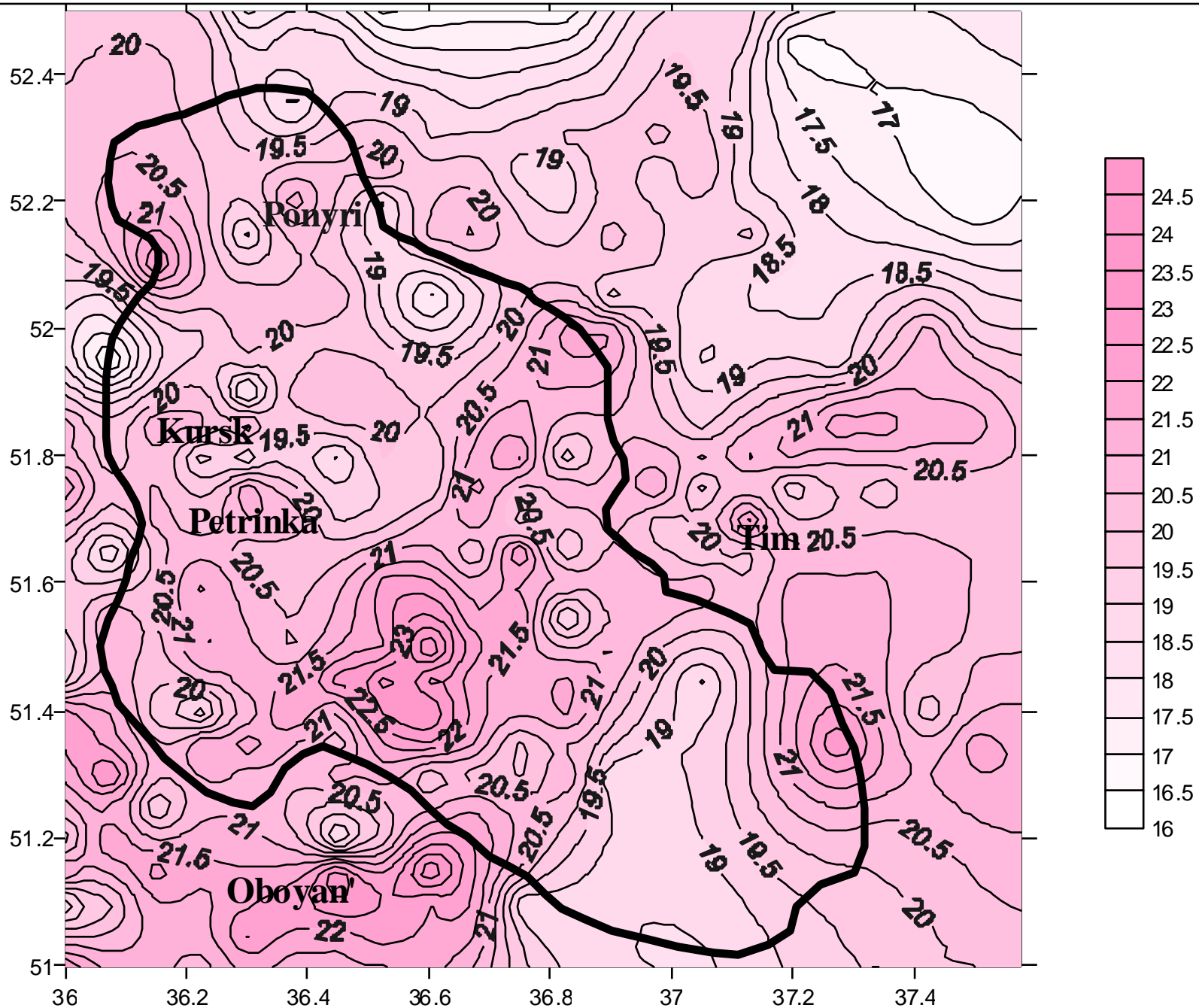


Рассчитанные по модели значения температуры листовой поверхности T_f и измеренные значения температуры воздуха T_a для участка с озимой пшеницей на агрометеостанции Петринка для сезона вегетации 1999 г.



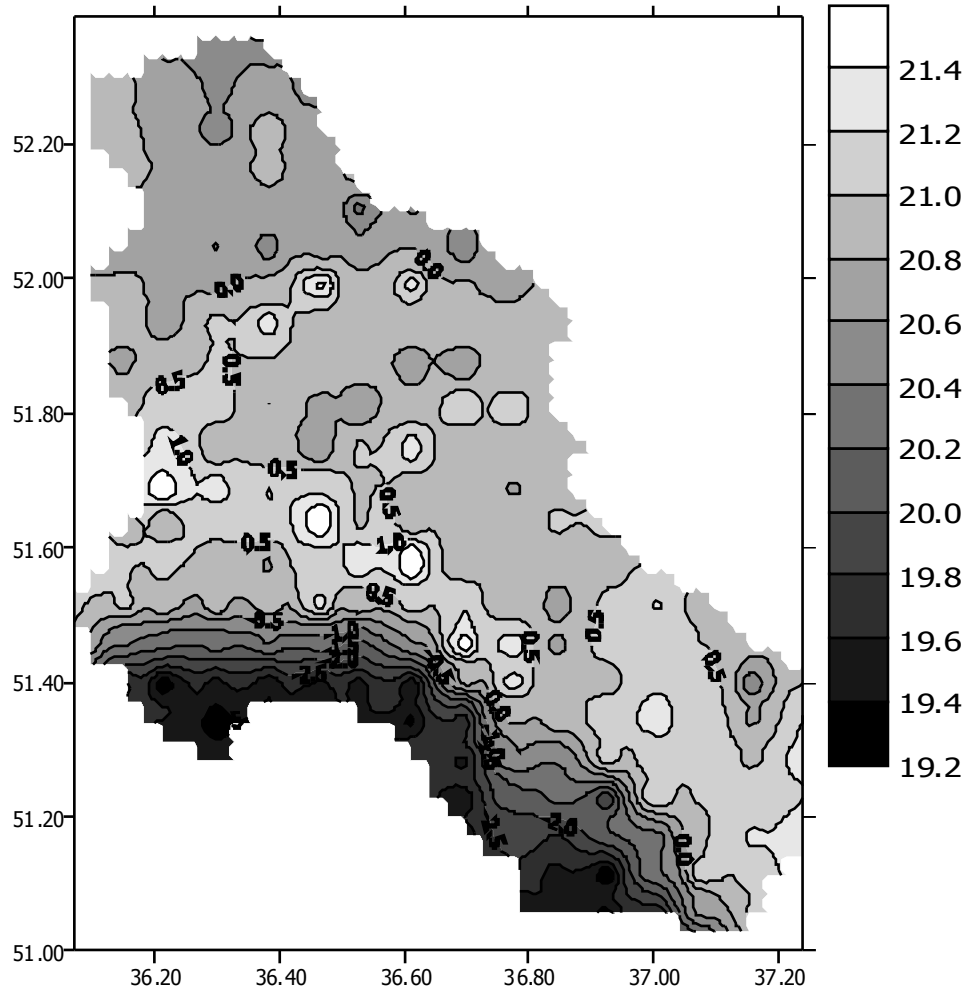
Суммарное испарение E_v для участка с многолетними травами на агрометеостанции Нижнедевицк для сезона вегетации 2002 г., рассчитанные по модели с использованием значений LAI, определенных по наземным (1) и спутниковым (2) данным. Кривая (3) соответствует измеренным значениям E_v .

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

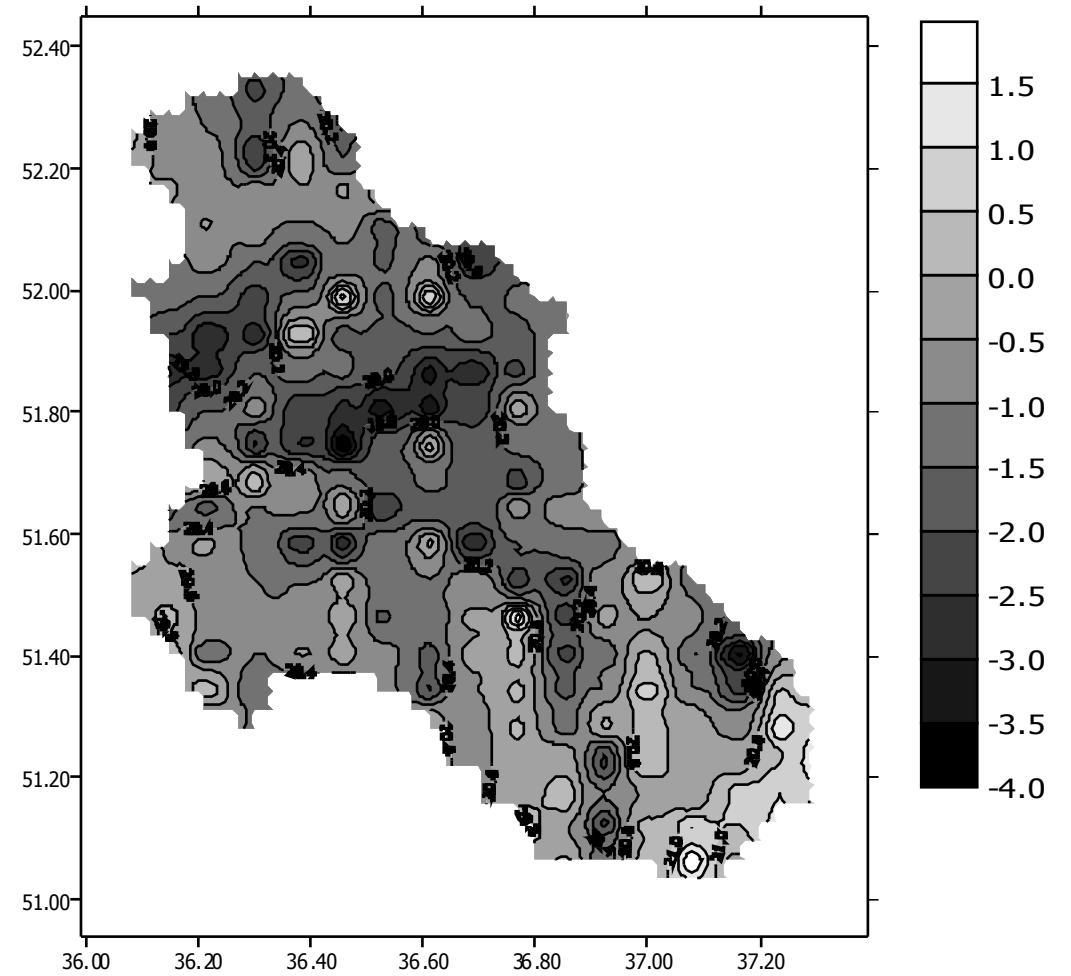


Карта эффективной температуры подстилающей поверхности $T_{s,eff}$, определенной по данным AVHRR/NOAA-14 (а), и разности температур ($dT = T_{s,eff} - T_s$) (б) для водосбора р.Сейм с пространственным разрешением ~ 10 км для 12 мая 1997 г.

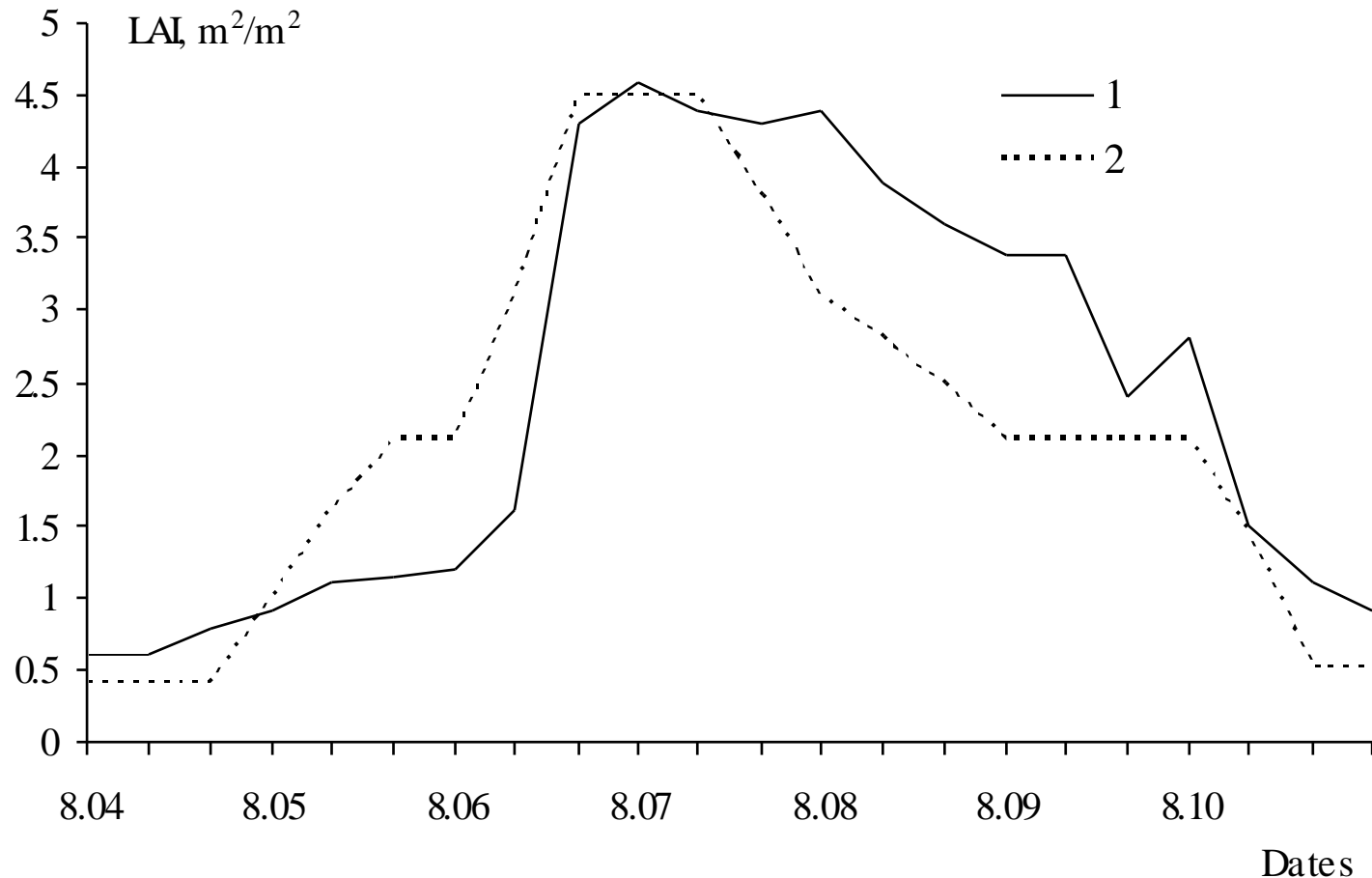
а)



б)

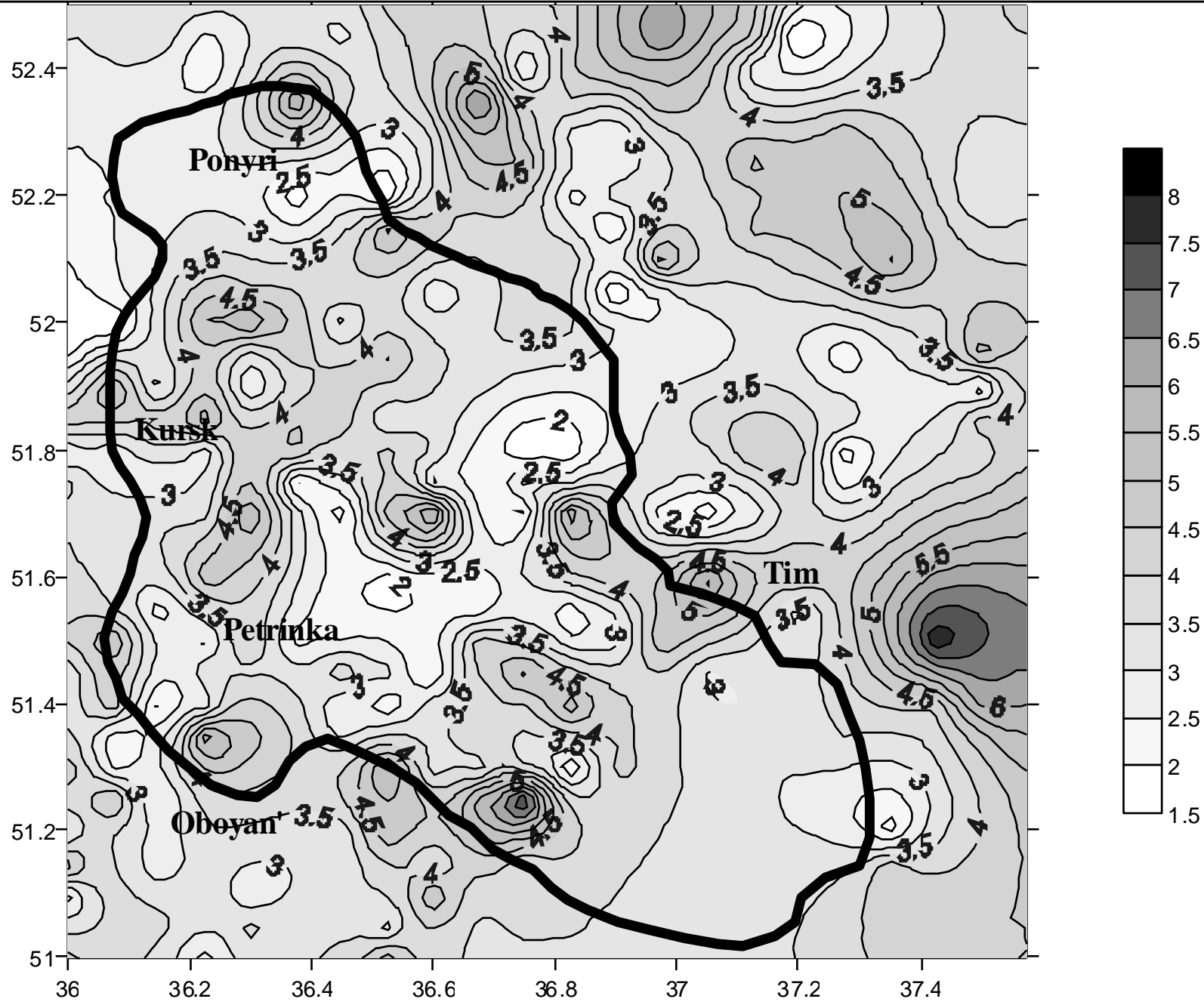


$LAI = -2.5 * \ln(1.2 - 2 * NDVI)$ – для сельскохозяйственных культур
 $LAI = NDVI * 1.71 + 0.48$ – для травяных культур

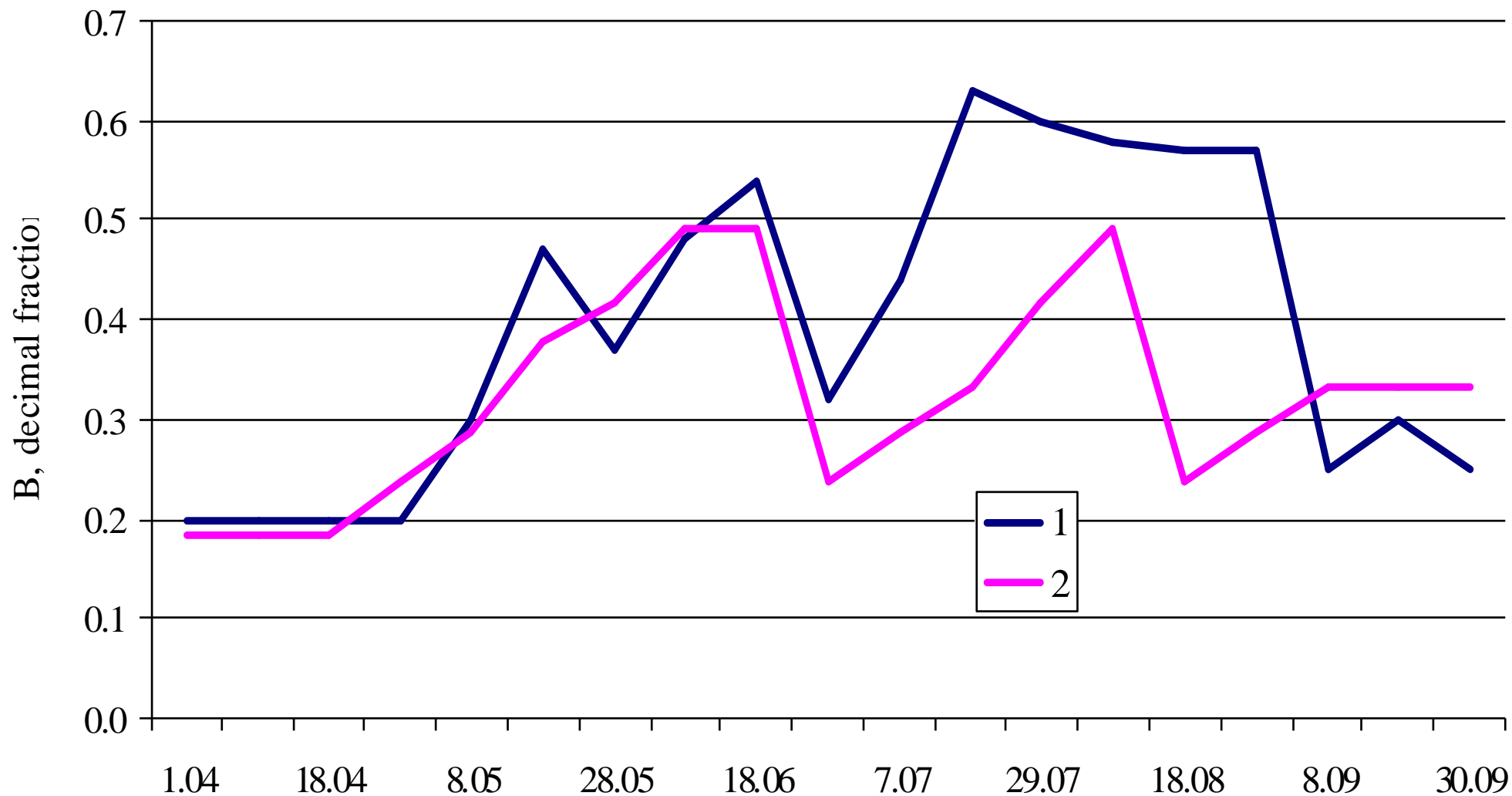


Листовой индекс LAI, определенный по спутниковым (1) и наземным (2) данным для участка с многолетними травами на агрометеостанции Курск для сезона вегетации 2003 г.

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



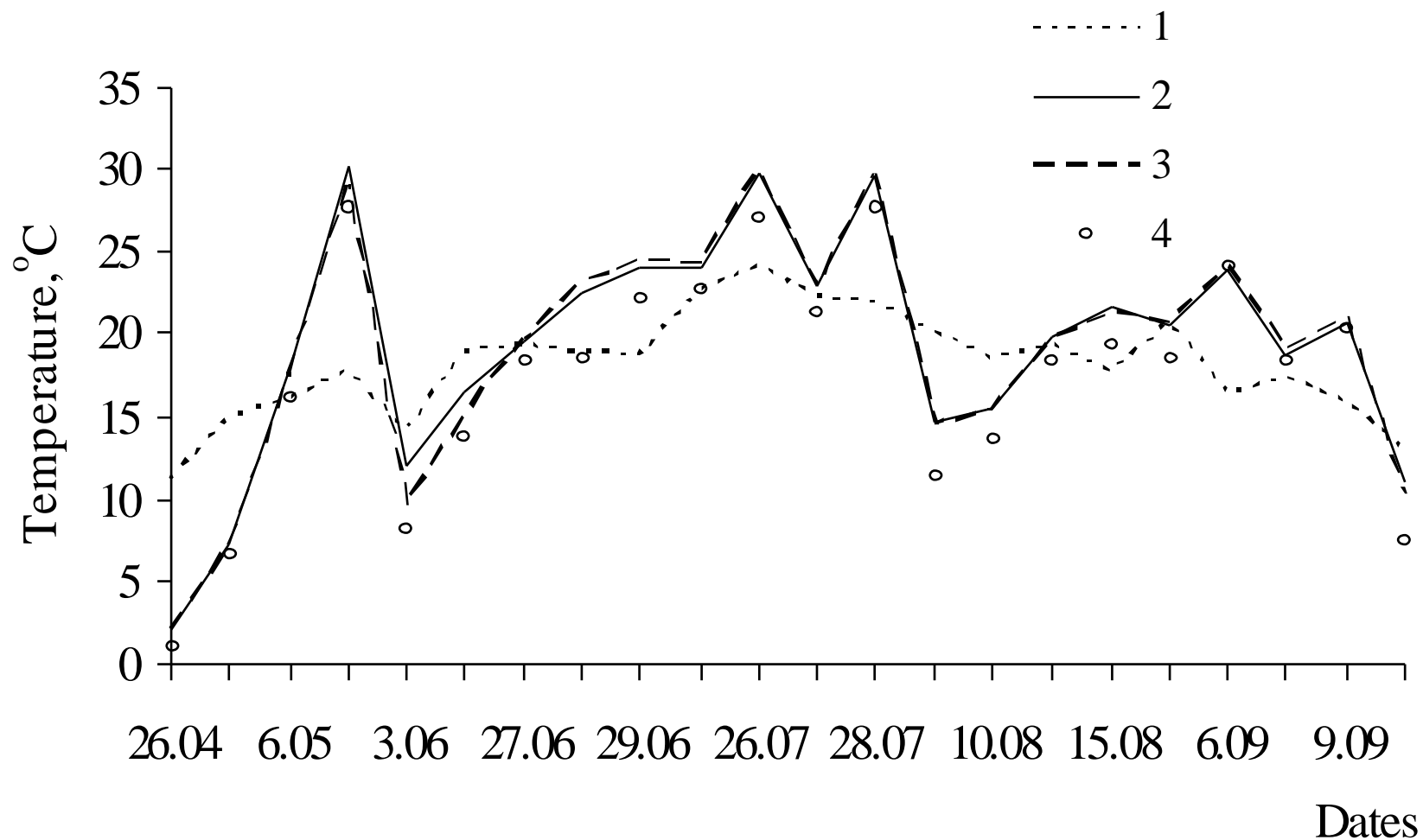
Проективное покрытие растительностью В, определенное с использованием спутниковых (AVHRR/NOAA) (1) данных и данных наземных наблюдений (2) для участка с многолетними травами на агрометеостанции Курск, 1999 г.

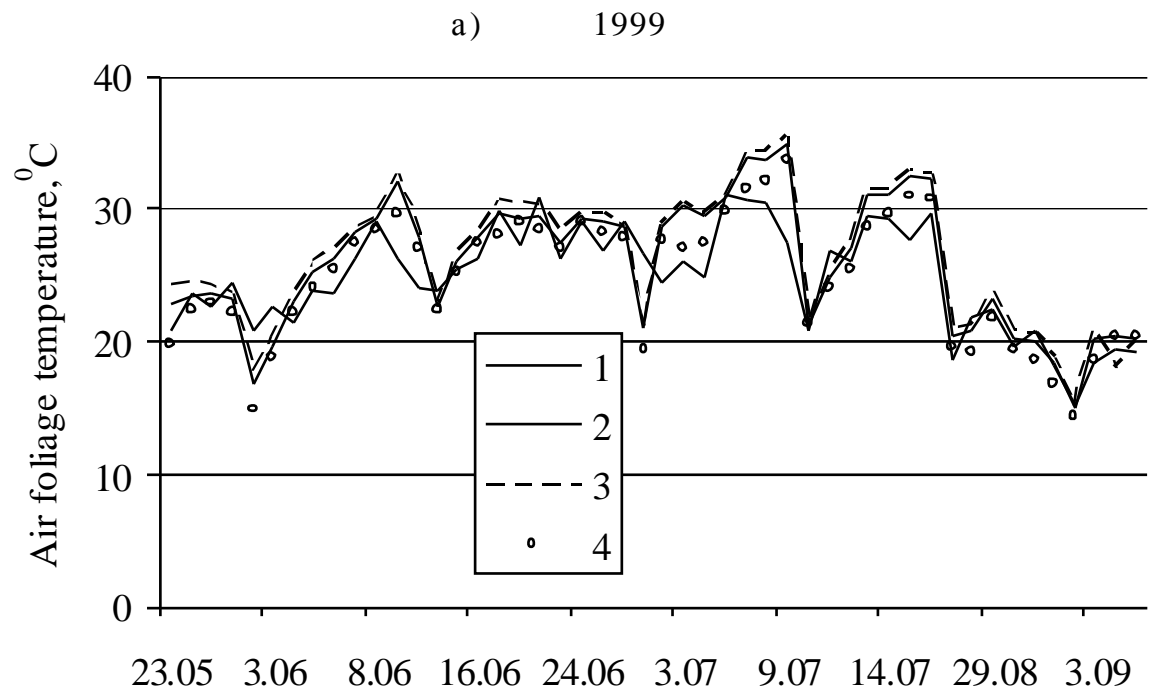


$$B = 1 - \exp(-p \text{ LAI})$$

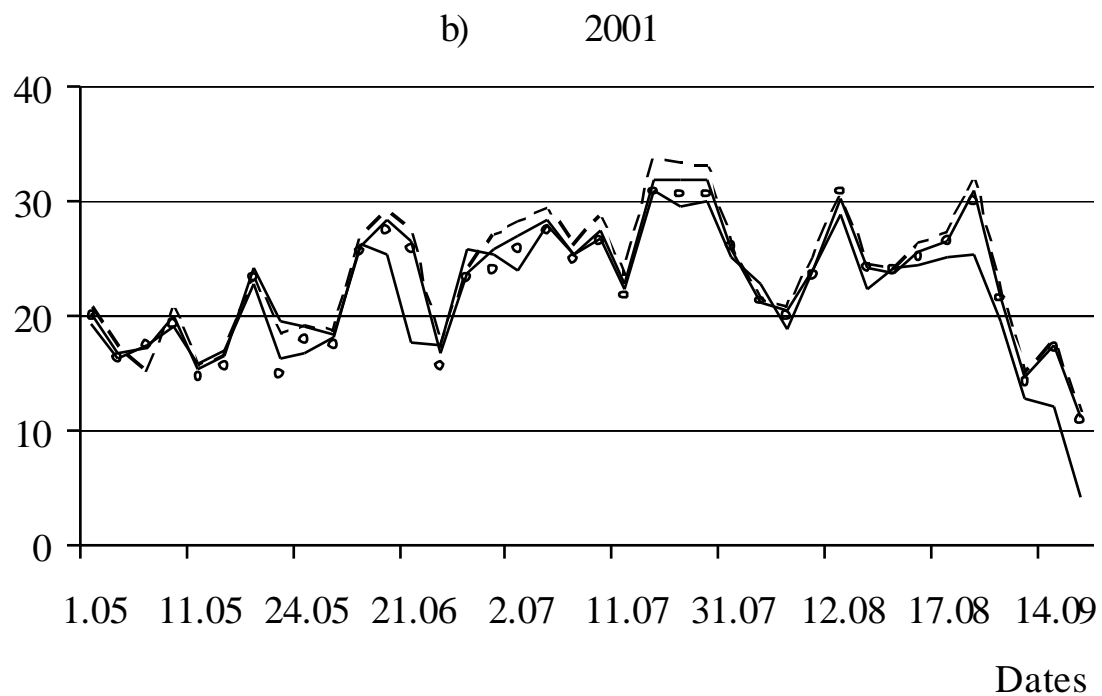
Dates

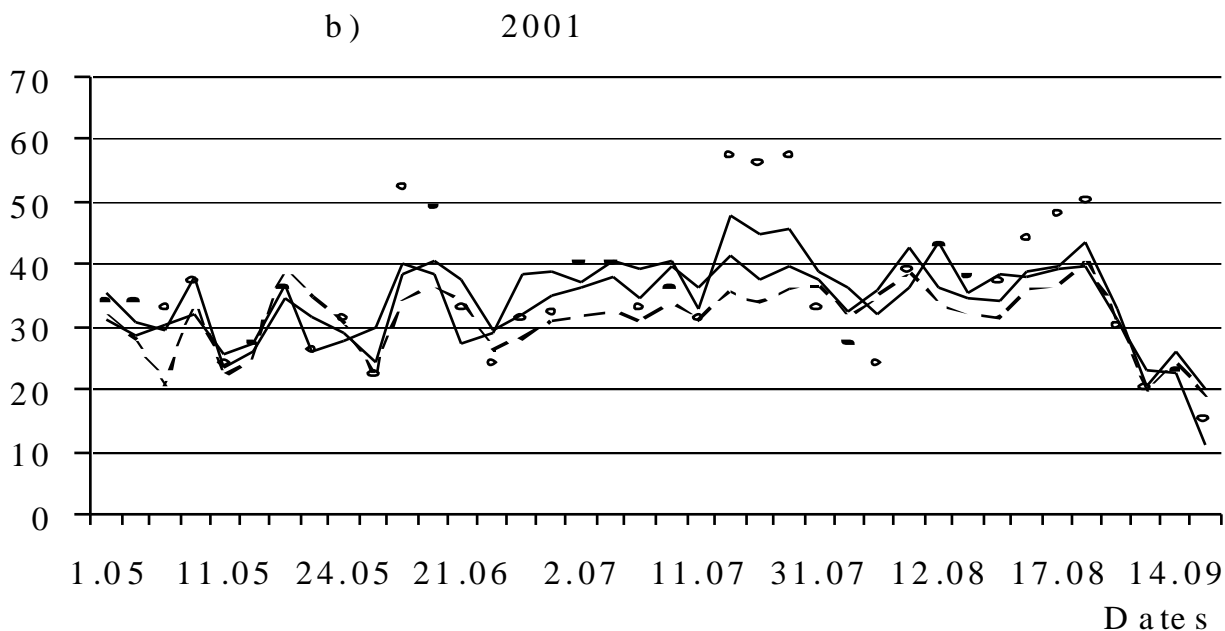
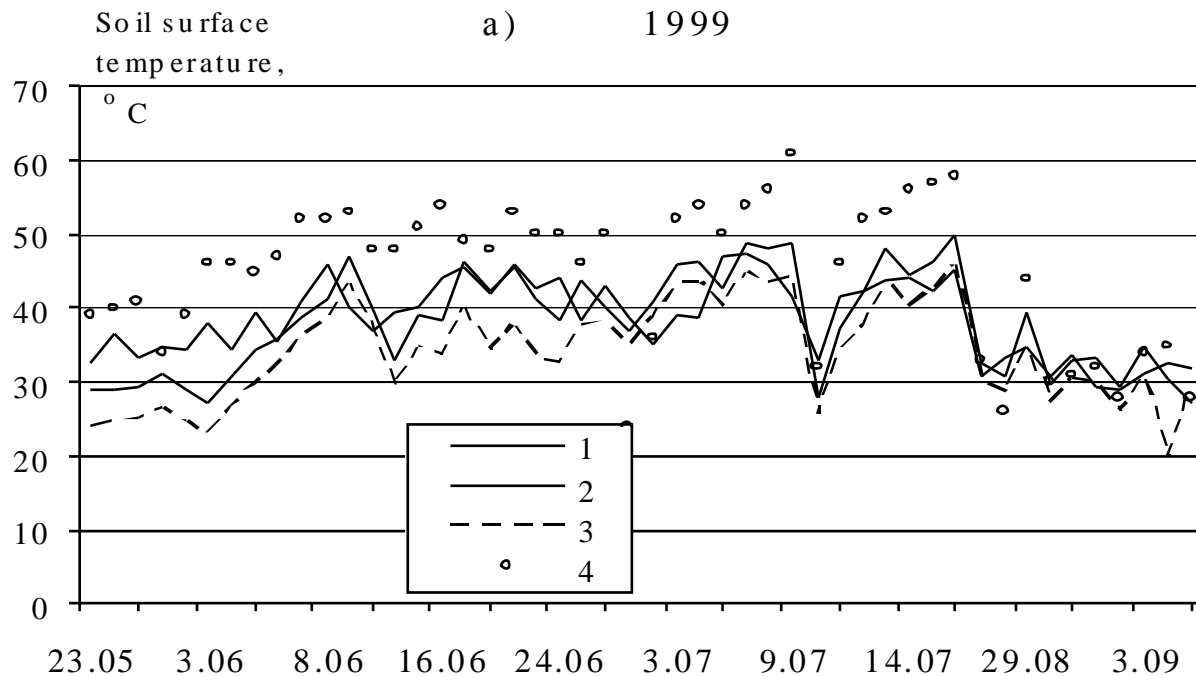
Температура поверхности растительного покрова для сезона вегетации 2003 г., определённая по спутниковым данным, T_a (1) и вычисленная по модели, T_f с использованием оценок LAI и В по спутниковым (2) и наземным (3) данным для участка с многолетними травами на агрометеостанции Курск. Кривая (4) соответствует измеренной температуре воздуха.



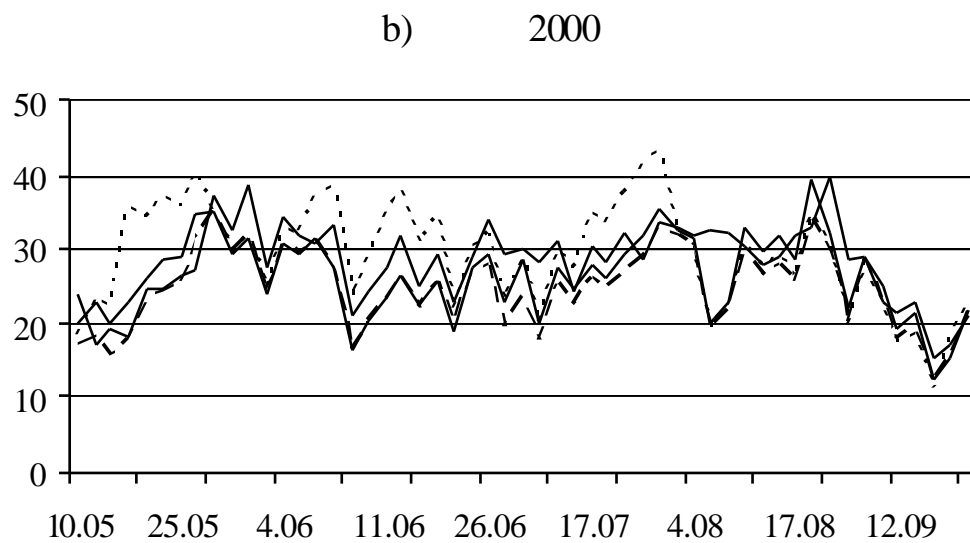
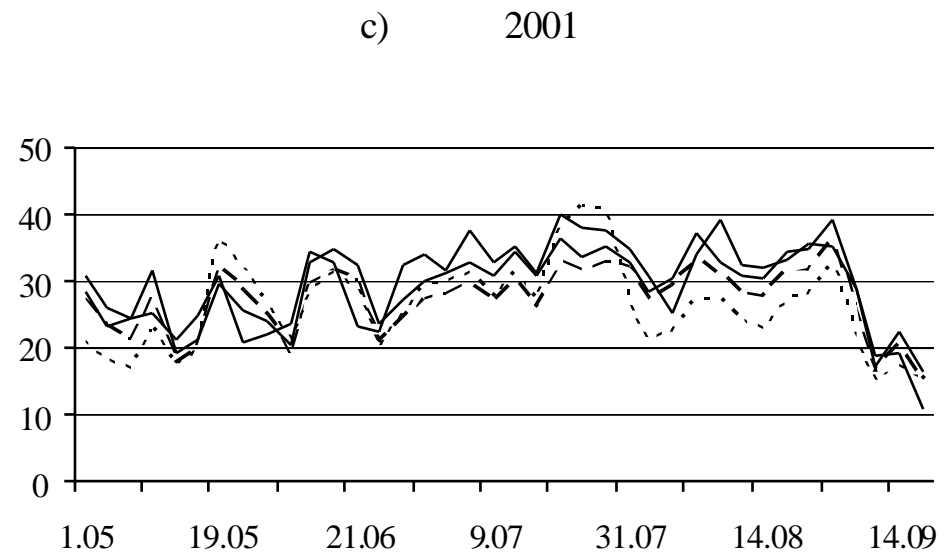
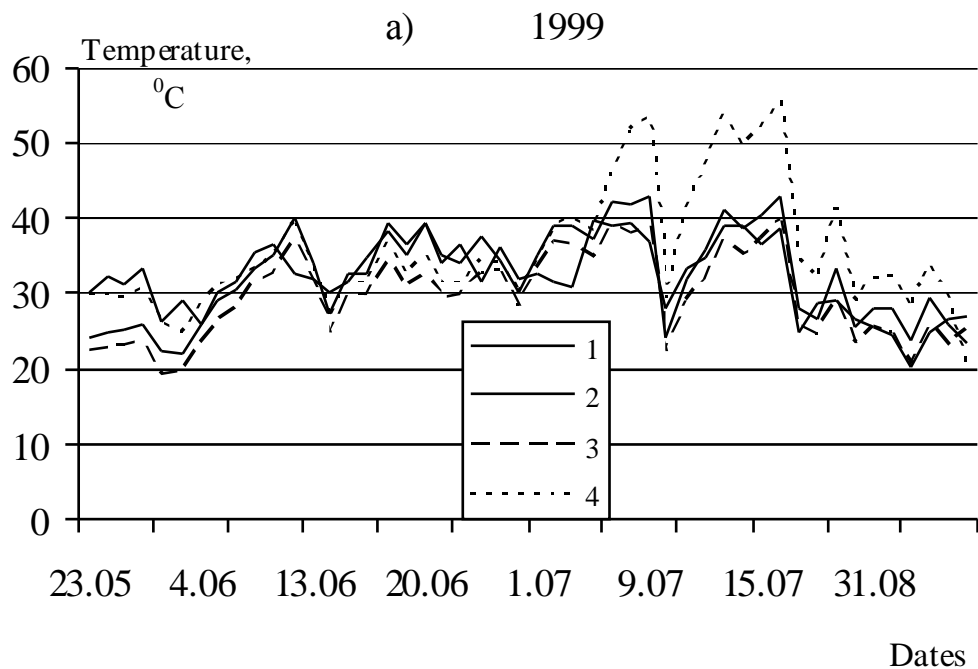


Температура поверхности растительного покрова для сезонов вегетации 1999 (а) и 2001 (б) гг., определённая по спутниковым данным, T_a (1) и вычисленная по модели, T_f с использованием оценок LAI по спутниковым данным и рассчитанным (2) и определенным по спутниковой информации (3) В для участка с многолетними травами. (4) – измеренная температура воздуха.



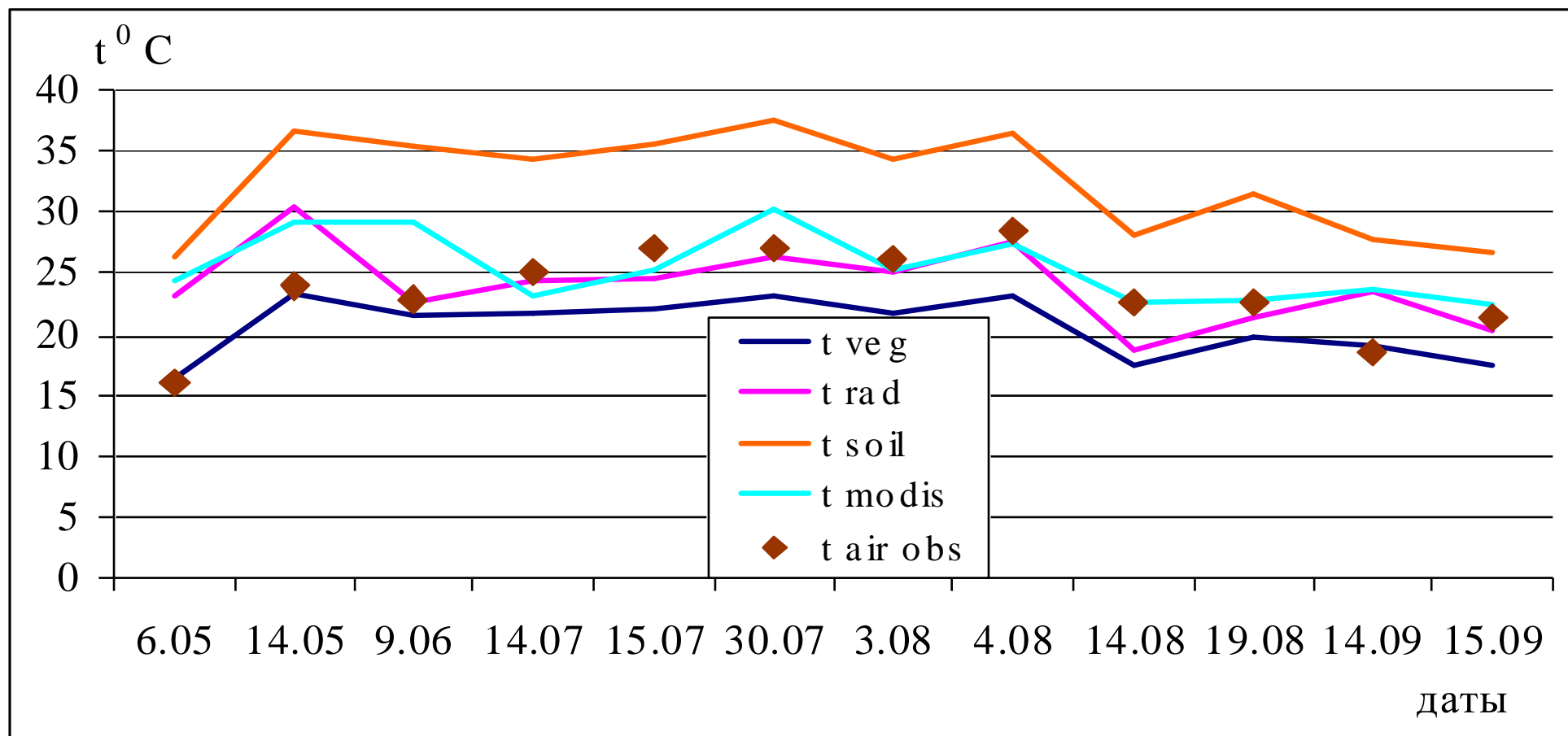


Температура поверхности почвы для сезонов вегетации 1999 (а) и 2001(б) гг., определённая по спутниковым данным, T_{sg} (1), и вычисленная по модели, T_g с использованием оценок LAI по спутниковым данным и рассчитанным (2) и определенным по спутниковой информации (3) V для участка с многолетними травами. (4) – измеренная температура поверхности почвы.

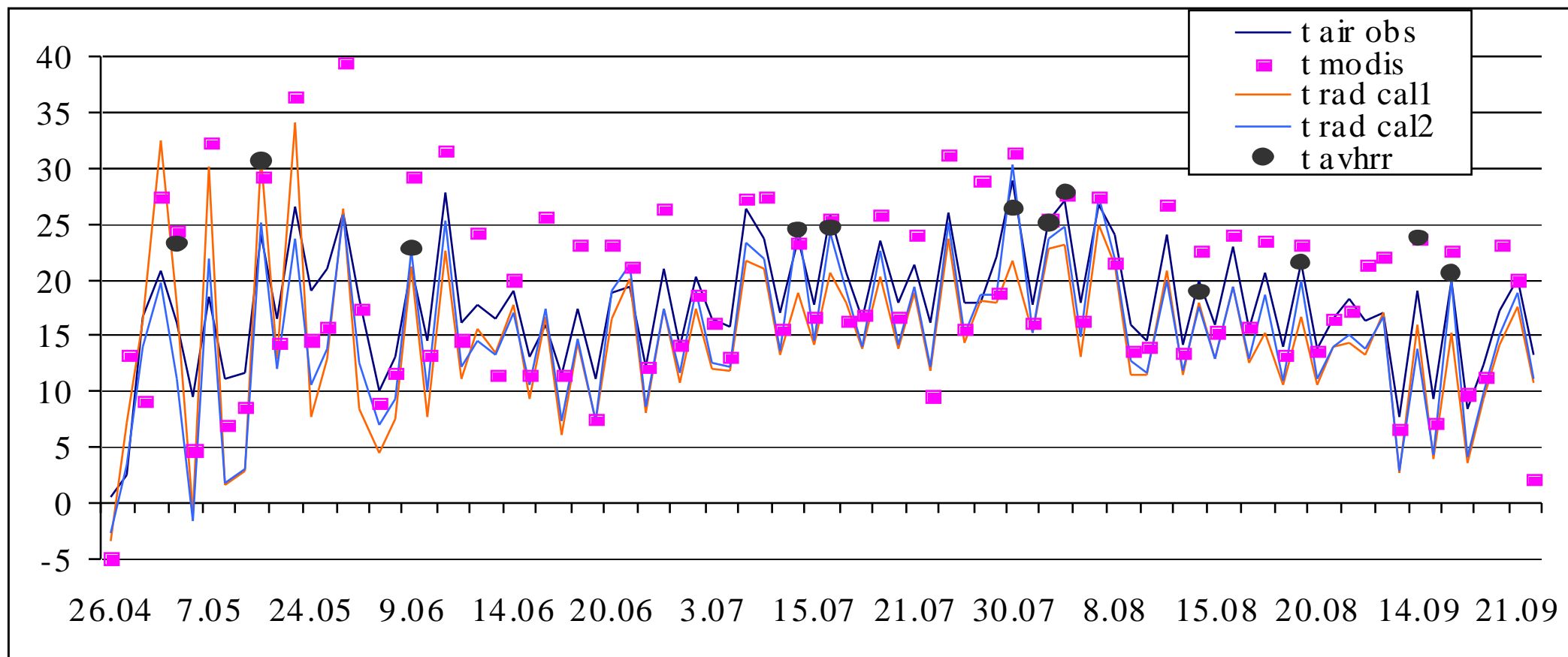


Радиационная температура подстилающей поверхности для сезонов вегетации 1999 (а), 2000 (б) и 2001 (в) гг., определенная по спутниковым данным, $T_{s,eff}$ (1), и вычисленная по модели, T_s : по спутниковым LAI и рассчитанным В (2), по спутниковым LAI и В (3), по наземным LAI и В (4) для участка с многолетними травами для агрометеостанции Курск

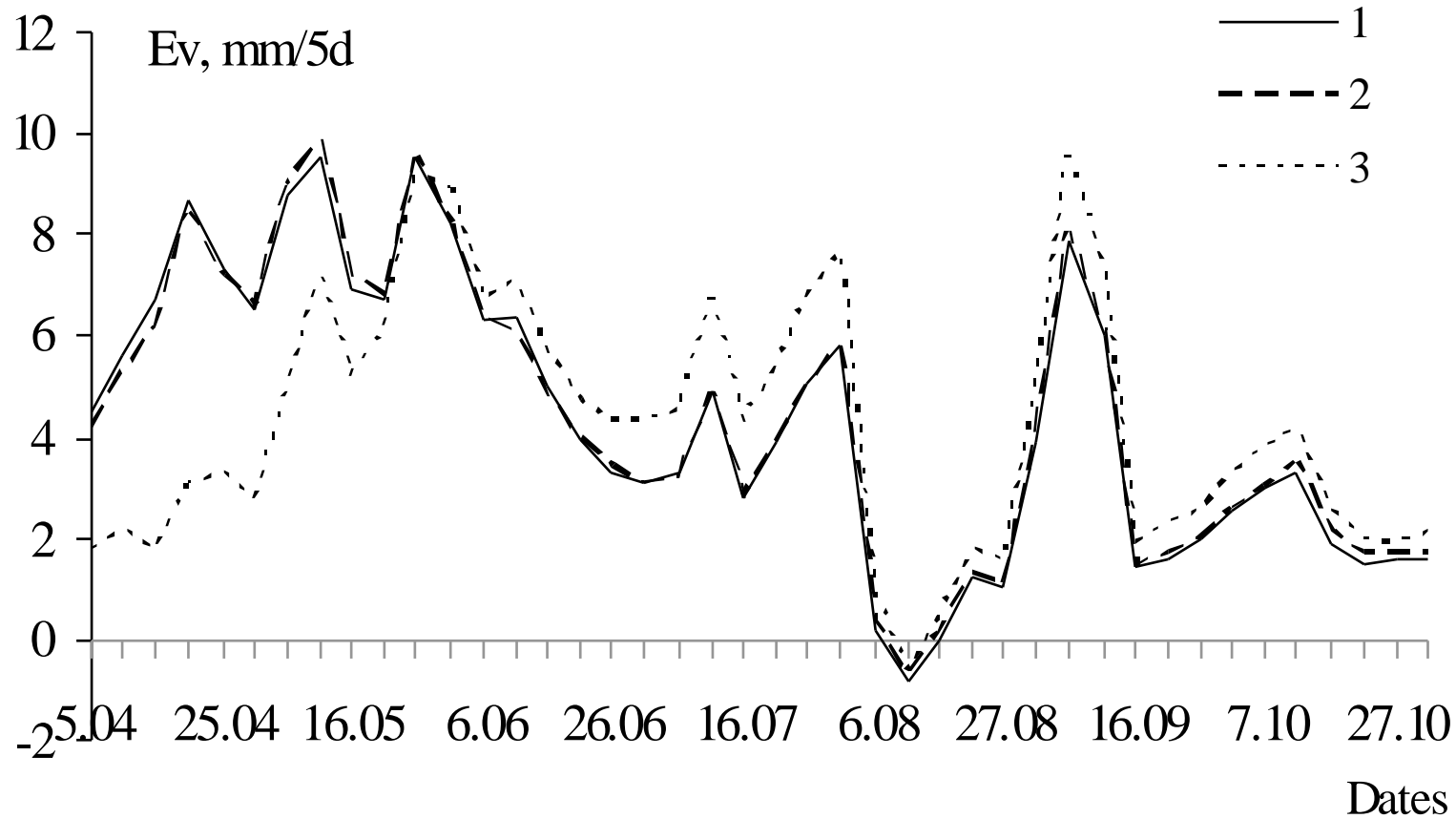
Значения температур поверхности растительного покрова T_{veg} , поверхности почвы T_{soil} , радиационной температуры подстилающей поверхности T_{rad} , определенных по данным AVHRR/NOAA и аналогичной радиационной температуры, определенной по данным MODIS/Terra T_{modis} . $T_{air\ obs}$ – наблюдаемая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



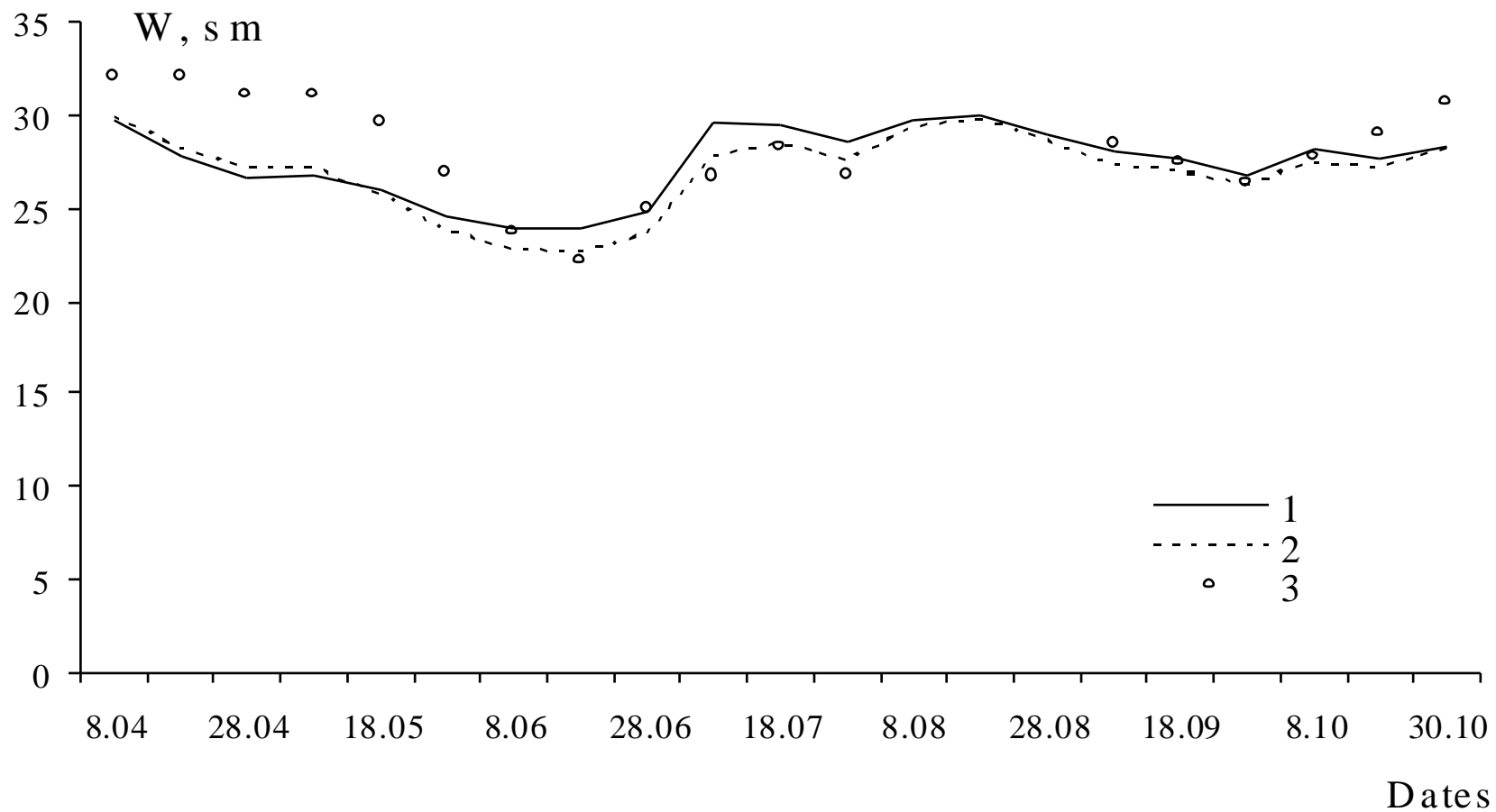
Значения радиационной температуры подстилающей поверхности, определенной по данным AVHRR/NOAA, T_{avhrr} , и MODIS/Terra, T_{modis} и рассчитанной по модели при использовании значений LAI и В, определенных по наземным и спутниковым данным, $T_{rad\ cal1}$ и $T_{rad\ cal2}$. $T_{air\ obs}$ – наблюдаемая температура воздуха для участка с многолетними травами. Агростанция Нижнедевицк, 2003 г.



Суммарное испарение E_v для участка с многолетними травами на агрометеостанции Курск для сезона вегетации 2003 г., рассчитанное по модели с использованием: оценок LAI и В по спутниковым данным (1), таких же оценок LAI и рассчитанных по наземным данным оценок В (2), рассчитанных по наземным данным оценок LAI и В (3).

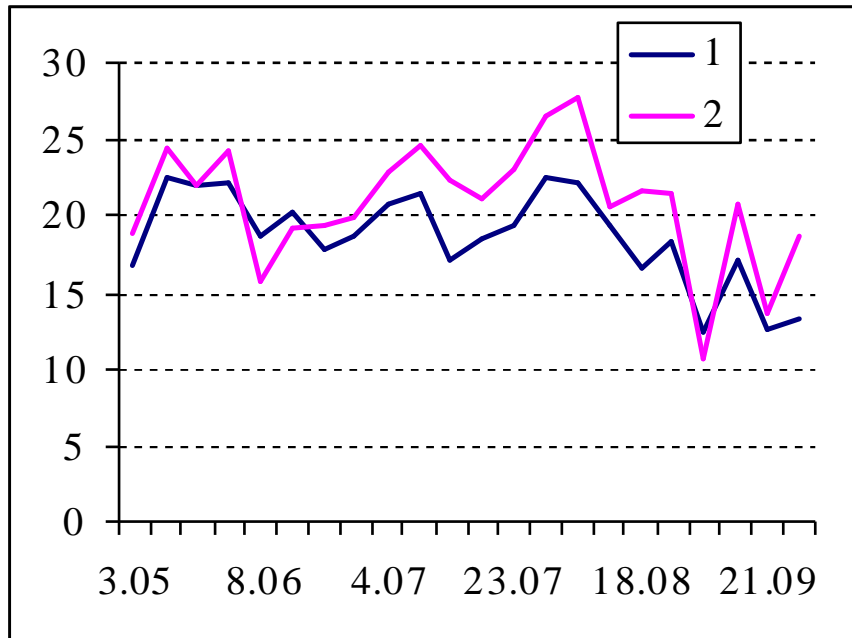


Влагосодержание метрового слоя почвы W , рассчитанное по модели с использованием оценок LAI по спутниковым (1) и наземным (2) данным. (3) – значения W , измеренные на агрометеостанции Курск для сезона вегетации 2003 г.

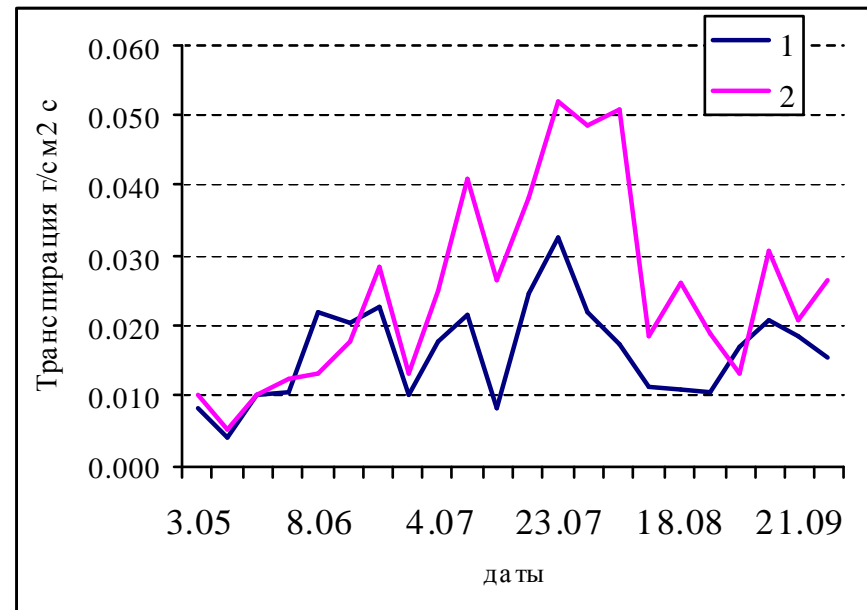


Температура поверхности растительного покрова а), определенная по данным радиометра AVHRR/NOAA для 13 (1) и 14 (2) ч. местного времени, и рассчитанные по модели значения интенсивности транспирации б) при использовании значений температур (1) и (2), соответственно. Агростанция Каменная степь, 2003 г.

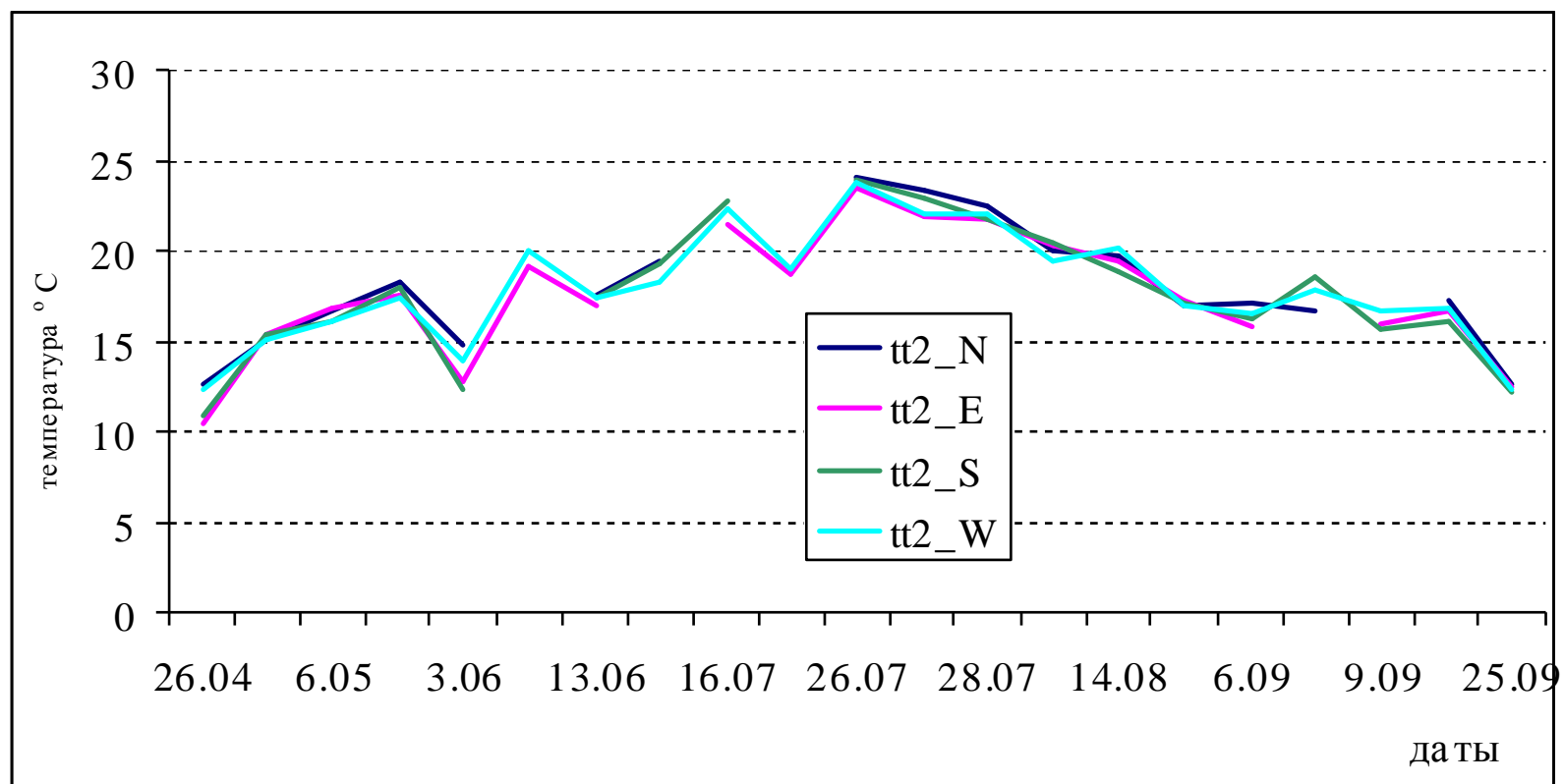
а)



б)



Температура поверхности растительного покрова, определенная по данным радиометра AVHRR/NOAA для ячеек 3x3 пиксела, окружающих агрометеостанцию Курск с севера (N), востока (W), юга (S) и запада (W). 2003 г.



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. 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 баланса речного водосбора.