

Двадцать вторая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

**Применение двухуровневой
энергобалансовой модели TSEB для анализа
пространственной неоднородности
транспирации и испарения с поверхности
почвы орошаемого агроценоза сои**

Доброхотов Алексей Вячеславович (dobralexey@gmail.com) – ФГБНУ АФИ

Зейлигер Анатолий Михайлович (azeiliger@mail.ru) – ИВП РАН

Козырева Людмила Владимировна (4ludak@gmail.com) – ФГБНУ АФИ

Москва, 2024

Модель TSEB

Two-source energy balance (TSEB) — модель оценки составляющих энергетического баланса растительной поверхности, разделяющая потоки для почвы и растительности

$$R_n = R_{ns} + R_{nc} = H + LE + G$$

где R_n — радиационный баланс (s — для почвы, c — для растительности), H — явный поток тепла (турбулентный теплообмен), LE — скрытый поток тепла (затраты тепла на испарение), G — поток тепла в почву.

$$R_{ns} = H_s + LE_s + G; R_{nc} = H_c + LE_c; G = c_G R_{ns}$$

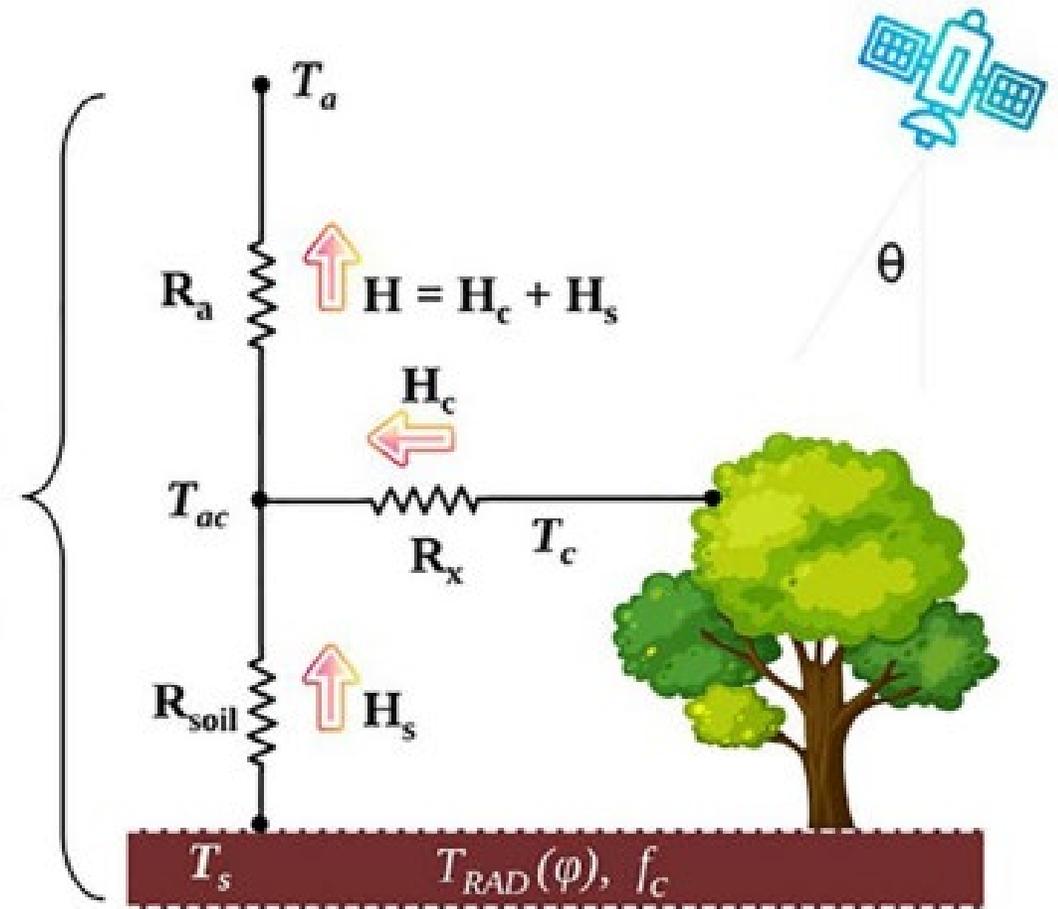
TSEB разделяет радиометрическую температуру поверхности ($LST = T_{RAD}(\theta)$) на компоненты — температуру почвы (T_s) и температуру растительности (T_c), учитывая зенитный угол обзора сенсора (θ) и проективное покрытие (f_c), рассчитываемого через индекс листовой поверхности (LAI)

$$T_{RAD}(\theta) = [f_c T_c^4 + (1 - f_c) T_s^4]^{0.25}$$

Компоненты температуры используются для расчета H над почвой и растительностью с использованием аэродинамического подхода с использованием сопротивлений (R_x, R_{soil}, R_a)

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_{ac}}{R_x}; H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_{ac}}{R_{soil}}; H = H_c + H_s = \rho C_p \frac{T_{ac} - T_a}{R_a}$$

Iterative Solution



Первая оценка LE_c происходит по формуле Пристли-Тейлора с коэффициентом $\alpha_{PT} = 1.26$

$$LE_c = \alpha_{PT} f_g \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc}$$

LE_s затем рассчитывается как остаточный член энергетического баланса. Однако, если растение находится в стрессе и транспирация лимитирована, то итеративно коэффициент α_{PT} уменьшается до сходимости алгоритма.

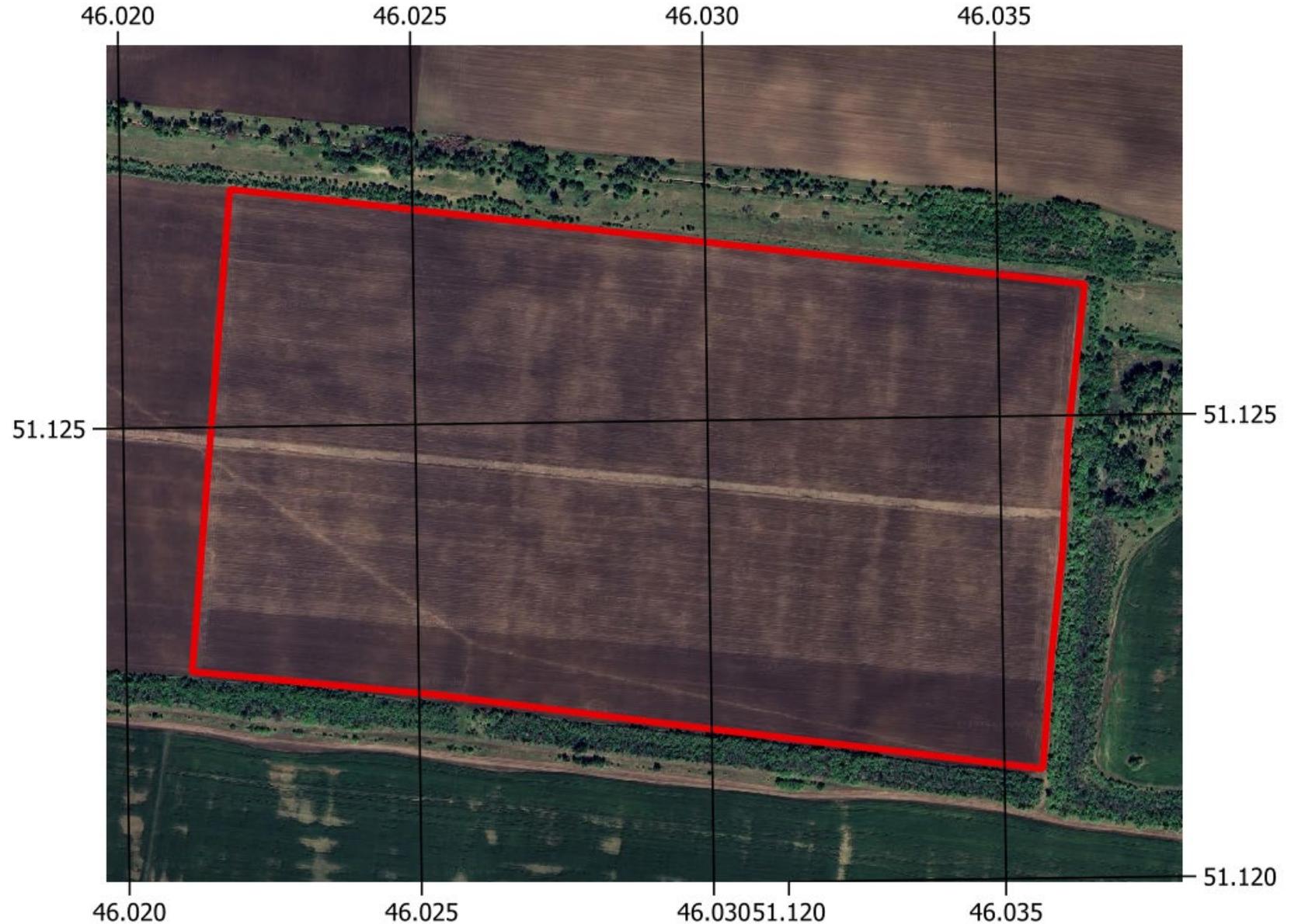
Объект исследования

Территория: УНПО
«Поволжье» Вавиловского
университета (Энгельский
район,
Саратовская
область),
сельскохозяйственное
поле

Культура: соя

Координаты: 51.125 ° с.ш.,
46.030° в.д.

Орошение: фронтальная
дождевальная машина
Zimmatic



Материалы и методы

Данные дистанционного зондирования Земли. В качестве данных ДЗЗ были использованы безоблачные изображения спутников Landsat 8-9. Данные Landsat 8-9 второго уровня обработки с применением радиометрической калибровки и атмосферной коррекции были получены с облачной платформы Google Earth Engine. В качестве данных ДЗЗ используются радиометрическая температура (T_{RAD}), а также оптические каналы для оценки параметров растительности.

Параметры растительности. Для инициализации модели TSEB требуются следующие параметры растительности: индекс листовой поверхности (LAI), проективное покрытие (f_c) и высота растений (h_c , м). Для оценки LAI был использован эмпирически метод (Liu, 2012), использующий вегетационный индекс EVI2. Данный метод показал наименьшую ошибку при моделировании LAI для сои (Nandan, 2022).

$$LAI = -(1/k) \ln(a(1 - b \times EVI2)) \quad \text{где } k = 0.273, a = 1.102, b = 0.910. \quad EVI2 = 2.5(NIR - RED)/(NIR + 2.4RED + 1)$$

Для оценки f_c были использованы рассчитанные значения LAI (Liang, 2021): $f_c = 1 - \exp(-0.5LAI/\cos\theta)$. Для определения h_c были использованы полевые измерения высоты растений на стадии полного покрытия и аппроксимация функцией сигмоиды от момента появления всходов.

Метеорологические данные. В качестве входных метеорологических данных использовались измерения полевой метеорологической станции, расположенной около сельскохозяйственного поля. Координаты метеостанции: 51.128936 с.ш., 45.995964 в.д. Были получены следующие метеовеличины: температура воздуха (T_a , K); скорость ветра (WS, м/с); упругость водяного пара (e_a , мб) (рассчитывалась через относительную влажность воздуха); атмосферное давление (мб). Также необходимые данные о высоте сенсора температуры (T_a h, м) и скорости ветра (WS h, м). Дополнительно к данным с метеорологической станции были получены данные суммарной радиации (R_s , Вт/м²) из климатического реанализа ERA5-Land (Muñoz-Sabater, 2021). Для оценки суточной эвапотранспирации (ET_{24}) значения R_s были агрегированы за сутки.

Метеорологические условия в момент пролета Landsat

Дата	Время	h_c , м	T_a , К	R_s , Вт/м ²	R_{s24} , Вт/м ²	WS, м/с	e_a , мб	P, мб	
2024-05-10		11.77	0	282.9	600	231.5	5.3	2.8	1014.3
2024-05-25		11.87	0	294.9	807.8	320.3	3	4.6	1024.1
2024-05-26		11.77	0	298.2	800.3	321.4	3.3	5.9	1016.2
2024-06-03		11.77	0.1	304.4	770.4	277.9	3.9	16.7	1005
2024-06-11		11.77	0.1	305.9	725.8	277	5.5	14	1009.1
2024-06-27		11.77	0.4	299.9	645.7	270	5.4	9.3	1001
2024-07-12		11.87	0.6	299.2	768.8	324.5	5.1	11.2	1008.6
2024-07-21		11.77	0.7	302.6	769.9	297.3	4.6	13.8	999.9
2024-07-28		11.87	0.7	304.4	759.5	272.3	1.2	10.9	1005.6
2024-08-22		11.77	0.7	297.9	677.1	250.9	2.1	10.8	1008
2024-08-29		11.87	0.7	304.9	592.4	216.6	0.3	9.4	1017
2024-09-06		11.87	0.7	295.2	627.9	218.3	0	8.2	1023.1
2024-09-14		11.87	0.7	298	594.8	199.3	2.9	6.8	1018.6
2024-09-22		11.87	0.7	297.1	536.1	172.4	3.7	10.8	1008
2024-09-30		11.87	0.7	297.8	513.2	159.3	1.6	7.5	1018.1

Скрытый поток тепла общий ($LE_s + LE_c$, Вт/м²) (эвапотранспирация)

2024 05 10



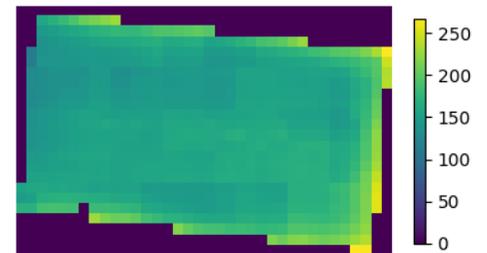
2024 05 25



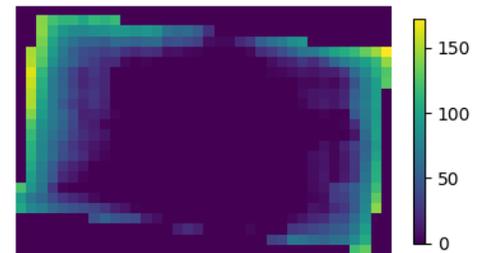
2024 05 26



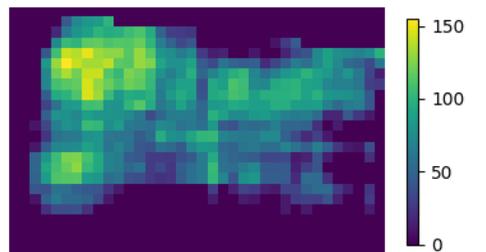
2024 06 03



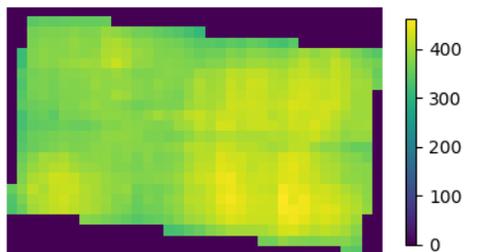
2024 06 11



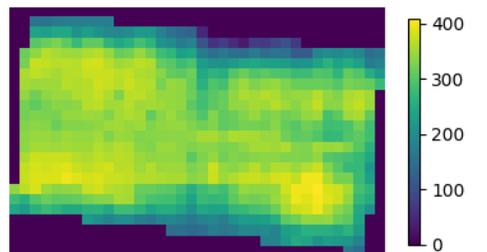
2024 06 27



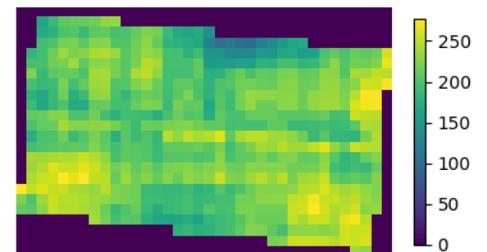
2024 07 12



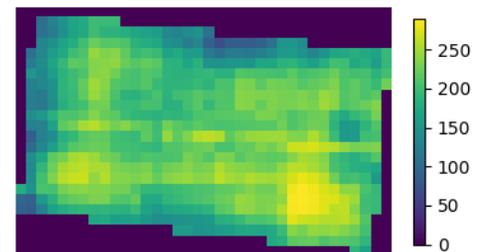
2024 07 21



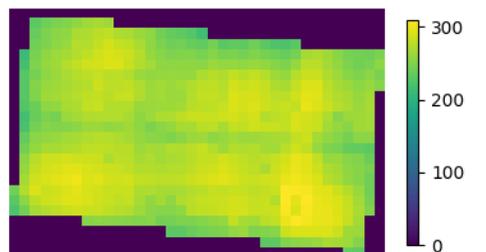
2024 07 28



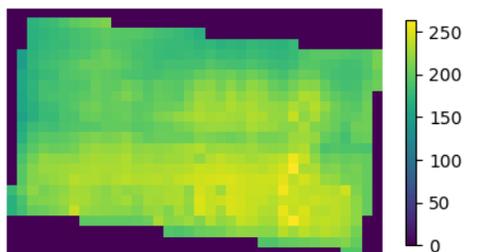
2024 08 22



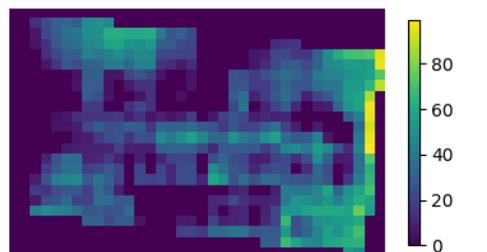
2024 08 29



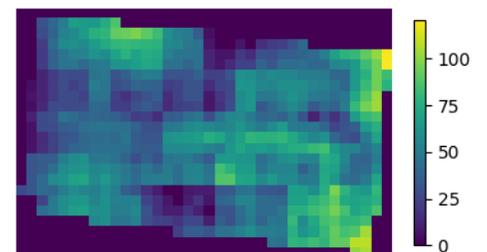
2024 09 06



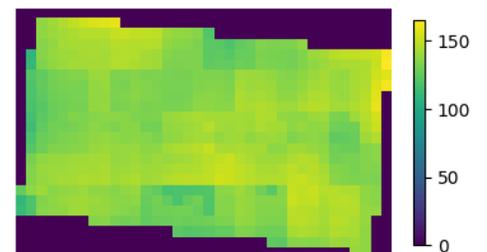
2024 09 14



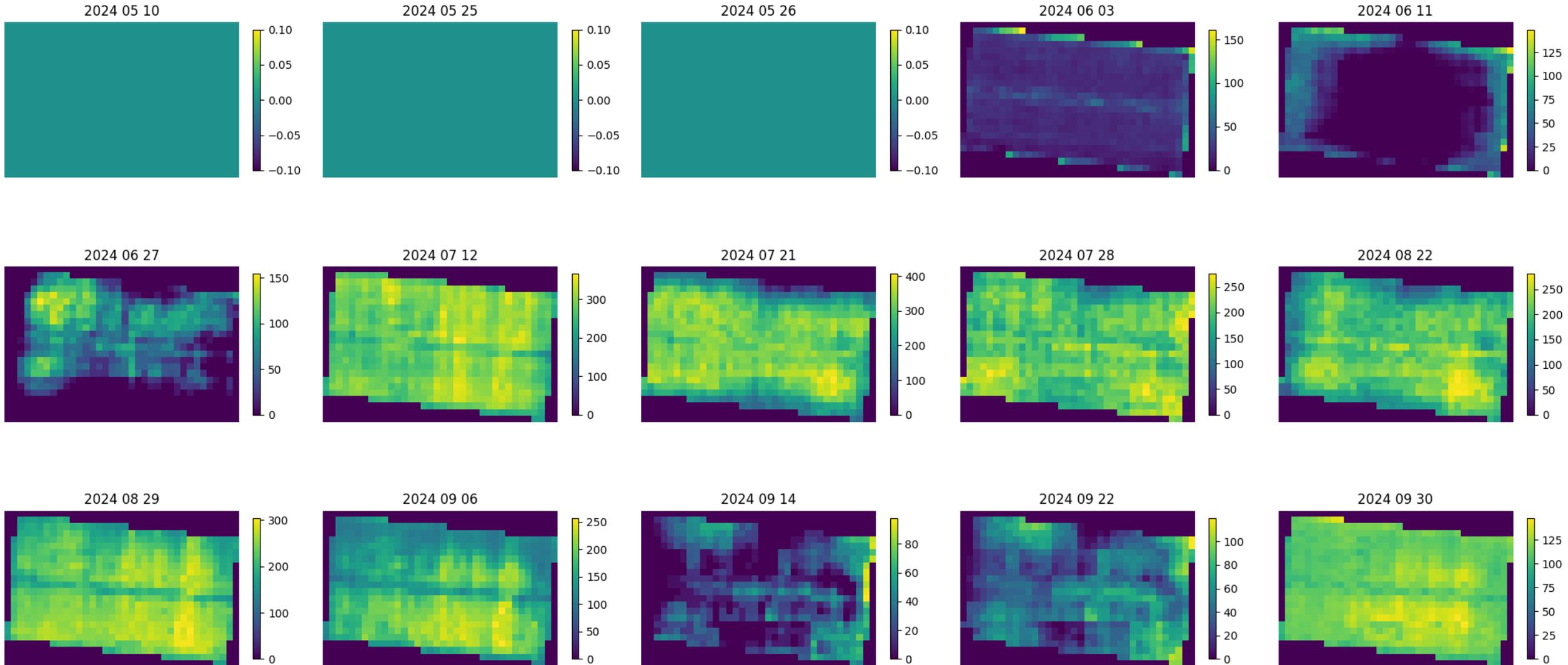
2024 09 22



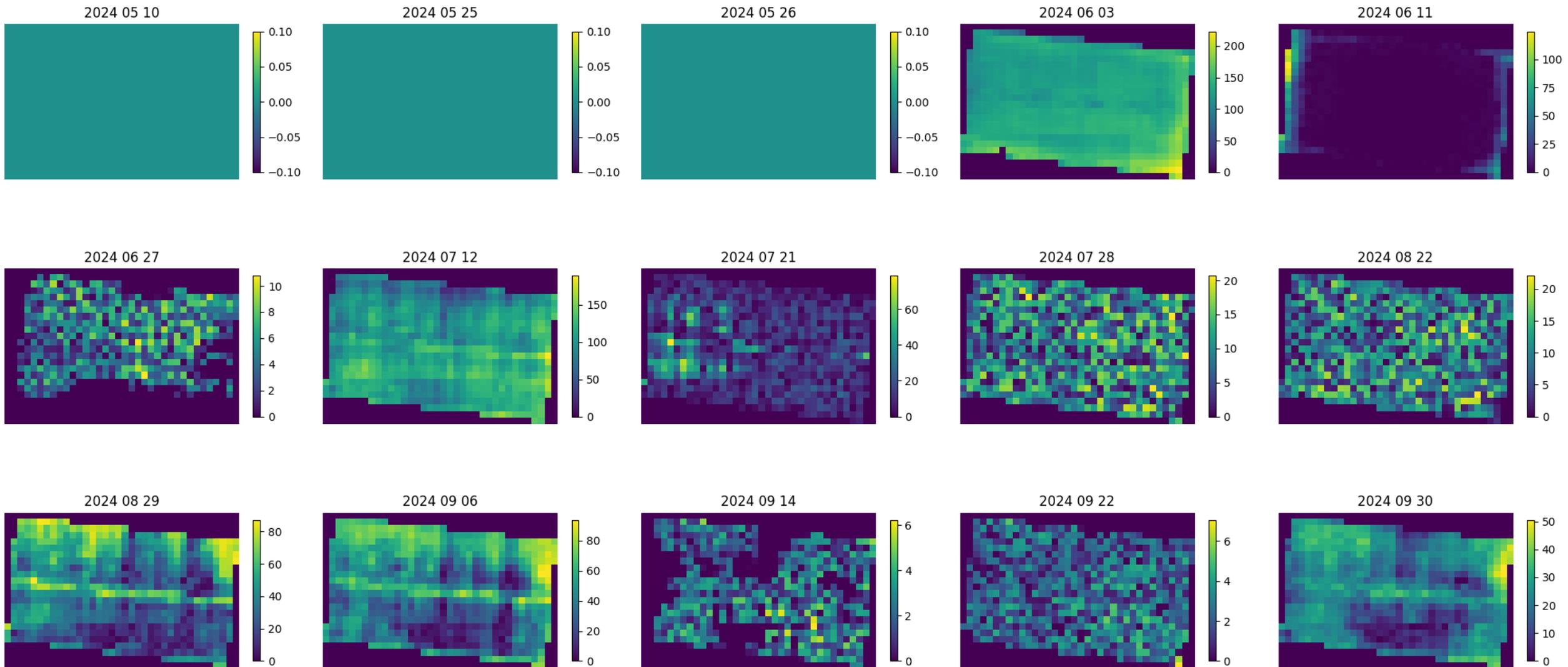
2024 09 30



Скрытый поток тепла для растительности (LE_c , Вт/м²) (транспирация)



Скрытый поток тепла для почвы (LE_s , Вт/м²) (испарение с поверхности почвы)



Литература

- 1) Norman, J.M., Kustas, W.P. and Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), pp.263-293.
- 2) Nieto, H. 2015. pyTSEB. Available online: <https://github.com/hectornieto/pyTSEB>
- 3) Liu, J., Pattey, E. and Jégo, G., 2012. Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. *Remote Sensing of Environment*, 123, pp.347-358.
- 4) Nandan, R., Bandaru, V., He, J., Daughtry, C., Gowda, P. and Suyker, A.E., 2022. Evaluating optical remote sensing methods for estimating leaf area index for corn and soybean. *Remote sensing*, 14(21), p.5301.
- 5) Liang, W.Z., Possignolo, I., Qiao, X., DeJonge, K., Irmak, S., Heeren, D. and Rudnick, D., 2021. Utilizing digital image processing and two-source energy balance model for the estimation of evapotranspiration of dry edible beans in western Nebraska. *Irrigation Science*, 39, pp.617-631.
- 6) Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. and Martens, B., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), pp.4349-4383.