



Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова
Географический факультет
Кафедра метеорологии и климатологии



Численное моделирование термического режима лесной экосистемы

Масляев М. А.¹, Степаненко В.М.^{1,2}, Курбатова Ю.А.³

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,

² НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,

³ Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова

Задачи:

- Переход от однослойной модели лесной экосистемы для блока деятельного слоя модели земной системы ИВМ РАН к многослойной;
- Разработка прототипа модели лесного полога, включающего в себя элементы:
 1. Вычисление потоков коротковолновой и длинноволновой радиации внутри полога леса
 2. Решение уравнений переноса тепла и влаги в пологе;
 3. Вычисление потоков скрытого и явного тепла на верхней границе;
- Провести валидацию модели на основе данных наблюдений из Центрально-Лесного заповедника (мачта Фёдоровское);

Перенос тепла в пологе леса:

- Решение уравнения теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q,$$

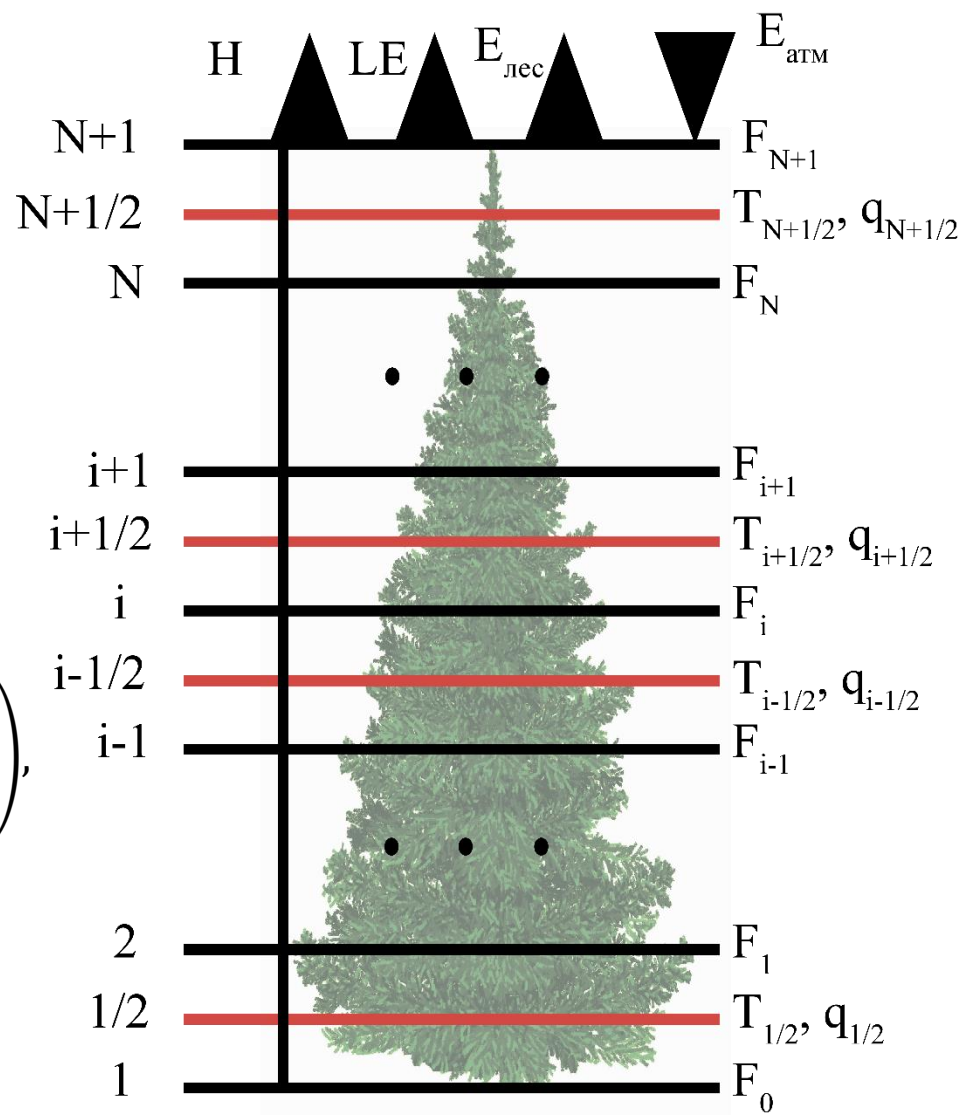
- Дискретизация уравнения (с учетом изменения λ с высотой по [Flerchinger, Pierson, 1991]):

$$\lambda = ku^* \frac{(z - d + z_h)}{\phi_s},$$

$$\frac{-\Delta Q_{s,i}}{\Delta z_i} + \rho C_p \frac{T_{i+1/2}^{n+1} - T_{i+1/2}^n}{\tau} = \frac{1}{\Delta z_i} \left(-\lambda_i \frac{T_{i-1/2}^{n+1} - T_{i+1/2}^{n+1}}{\frac{1}{2}(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + \lambda_{i+1} \frac{T_{i+3/2}^{n+1} - T_{i+1/2}^{n+1}}{\frac{1}{2}(\Delta z_{i+1} + \Delta z_i)} \right),$$

Граничные условия:

- Верхняя граница: $F_{N+1}^{n+1} = H + LE + \Delta E$,
- Нижняя граница: $F_0^{n+1} = 0$,



Перенос водяного пара в пологе леса:

- Уравнение переноса водяного пара:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial q}{\partial z} \right) + Q_{wv}, \quad \text{где } q - \text{отношение смеси};$$

- Дискретизация уравнения :

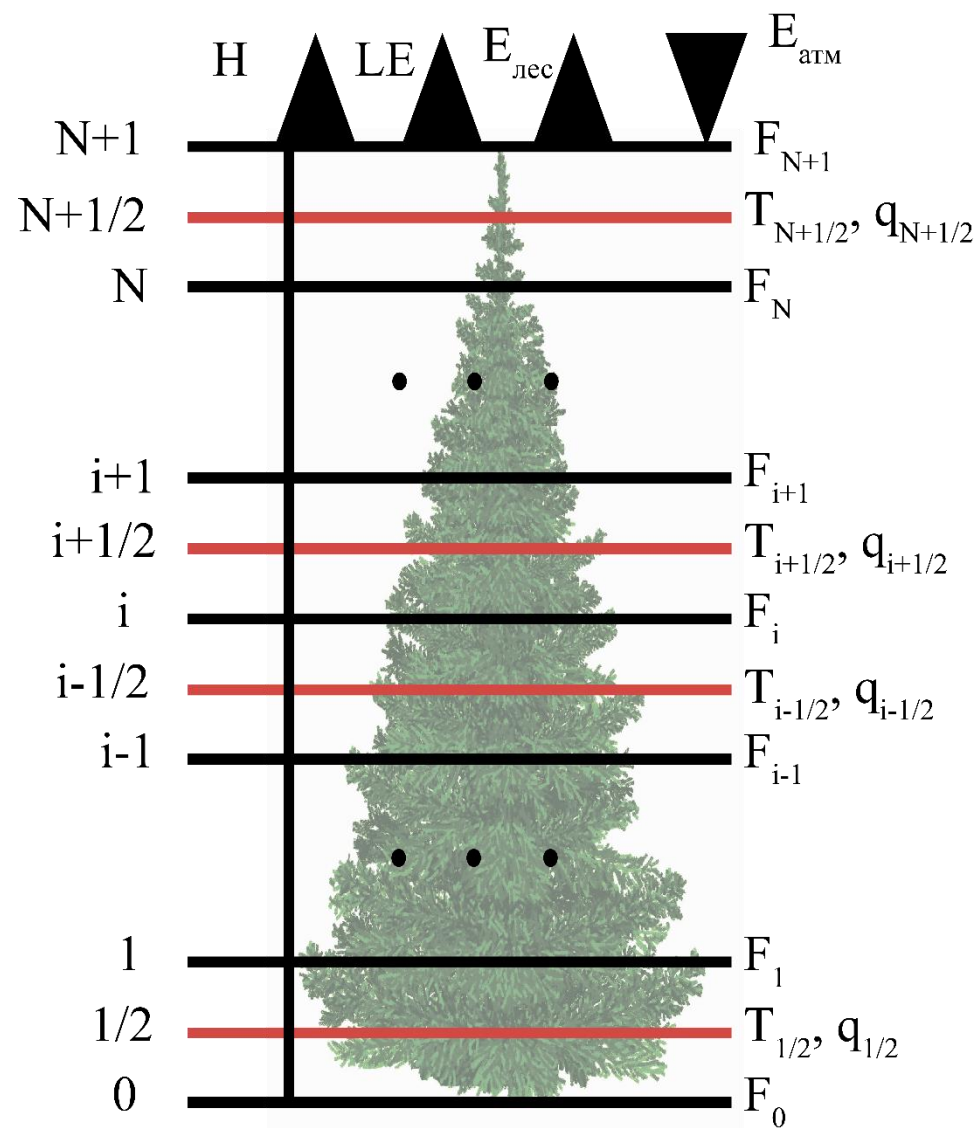
$$Q_{wv,i} + \frac{q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - q_{i+\frac{1}{2}}^n}{\tau} = \frac{1}{\Delta z_i} \left(-\lambda_i \frac{q_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{\frac{1}{2}(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + \lambda_{i+1} \frac{q_{i+\frac{3}{2}}^{n+1} - q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{\frac{1}{2}(\Delta z_{i+1} + \Delta z_i)} \right),$$

- Параметризация испарения:

$$Q_{wv,i} = \alpha \max(\cos(\psi), 0), \quad \text{где } \psi - \text{зенитный угол Солнца}$$

Граничные условия:

- Верхняя граница: $F_{wv,N+1}^{n+1} = LE$,
- Нижняя граница: $F_{wv,0}^{n+1} = 0$,



Перенос коротковолнового излучения:

- 2 спектральных диапазона: ФАР и ближний ИК;
- Вычисление переноса прямой радиации по закону Бэра-Бугера-Ламберта:

$$I_i = I_{i+1} \exp(-K(\psi)_i * LAI_i), \quad K(\psi)_i = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \psi}}{x + 1.744(x + 1.182)^{-0.733}},$$

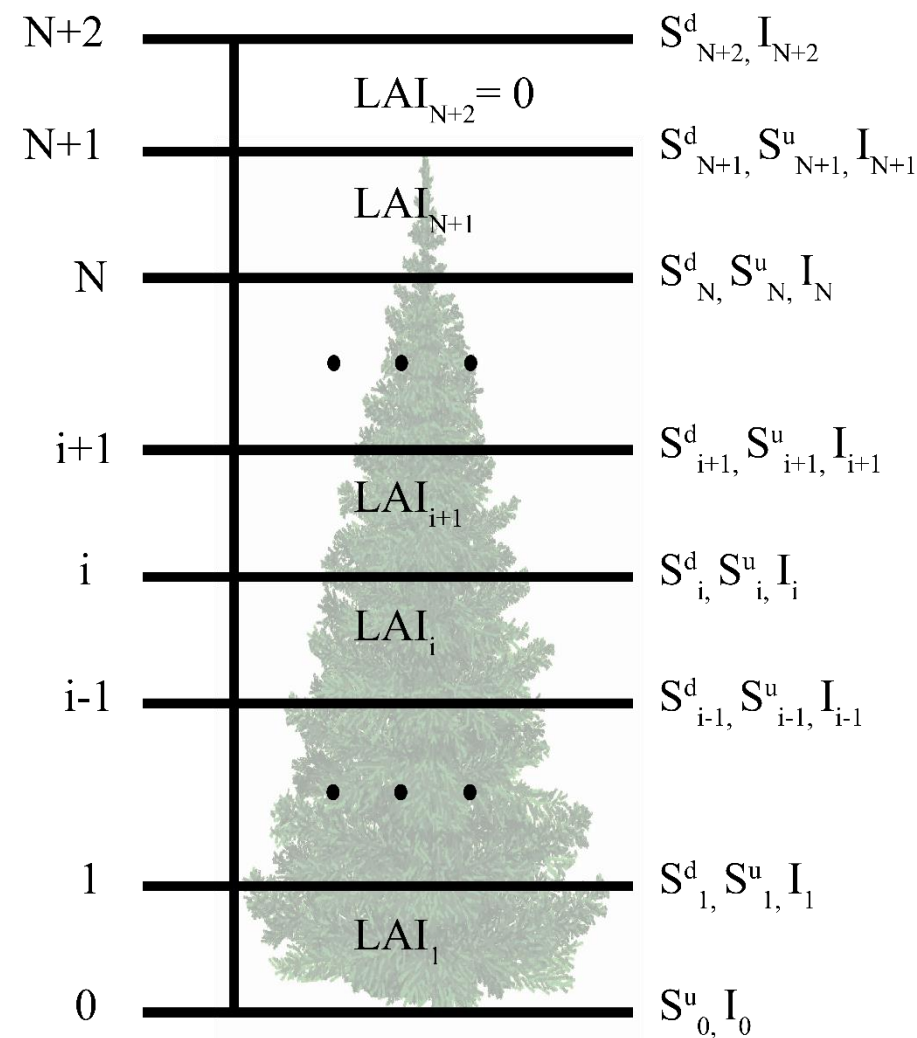
- Перенос рассеянной радиации - рассеяние на множестве слоев [Zhao, Qualls 2005]: решается система $2N+4$ линейных алгебраических уравнений:

$$A \times S = C,$$

$$S = (S_0^u, S_1^d, S_1^u, \dots, S_i^d, S_i^u, \dots, S_{n+1}^d, S_{n+1}^u, S_{n+2}^d),$$

S_j^u восходящие и S_j^d нисходящие потоки рассеянного излучения на j-ой границе слоев

- Правая часть (C) – рассеяние прямой радиации;
- Матрица A – трехдиагональная, система решается методом прогонки.



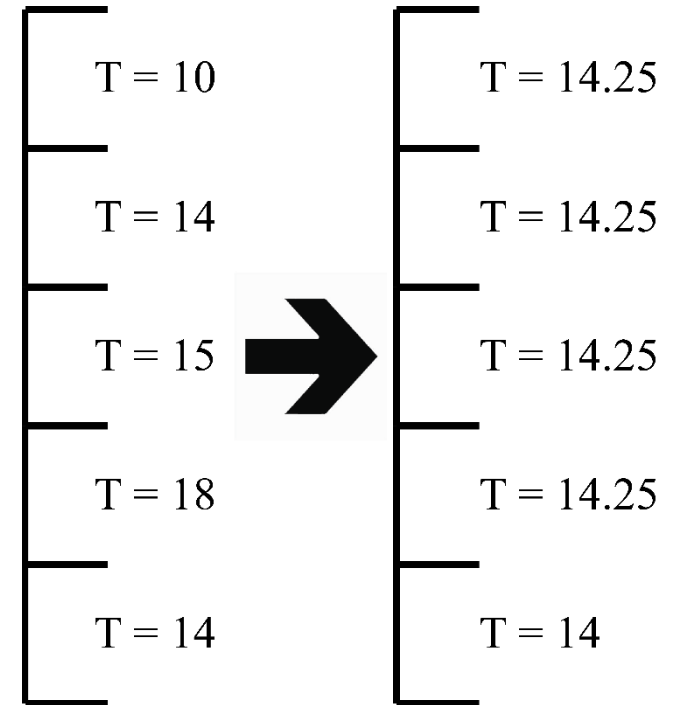
Конвективное приспособление:

- При неустойчивой стратификации выполняется конвективное приспособление:

$$T_i^{new} = T_{i+1}^{new} = \frac{\Delta z_i T_i^{old} + \Delta z_{i+1} T_{i+1}^{old}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} \text{ при } T_i^{old} > T_{i+1}^{old};$$

- Итерации приспособления – до состояния, что во всем профиле температура не убывает с высотой;
- При перемешивании слоев – приспособление профиля влажности:

$$q_i^{new} = q_{i+1}^{new} = \frac{\Delta z_i q_i^{old} + \Delta z_{i+1} q_{i+1}^{old}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}}$$



Данные измерений:

Входные данные для модели – измерения над пологом леса:

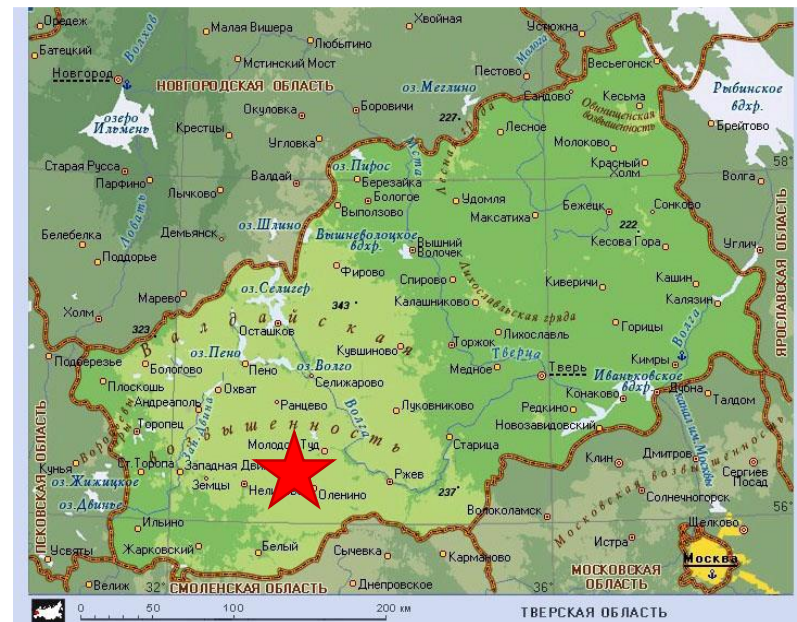
- Температура;
- Влажность;
- Скорость ветра;
- Нисходящая коротковолновая и длинноволновая радиация;
- Давление;

Данные для валидации:

- Потоки скрытого и явного тепла на верхней границе полога;
- Значения температуры и влажности в пологе (0.5, 1, 2, 7, 14.5 метров).

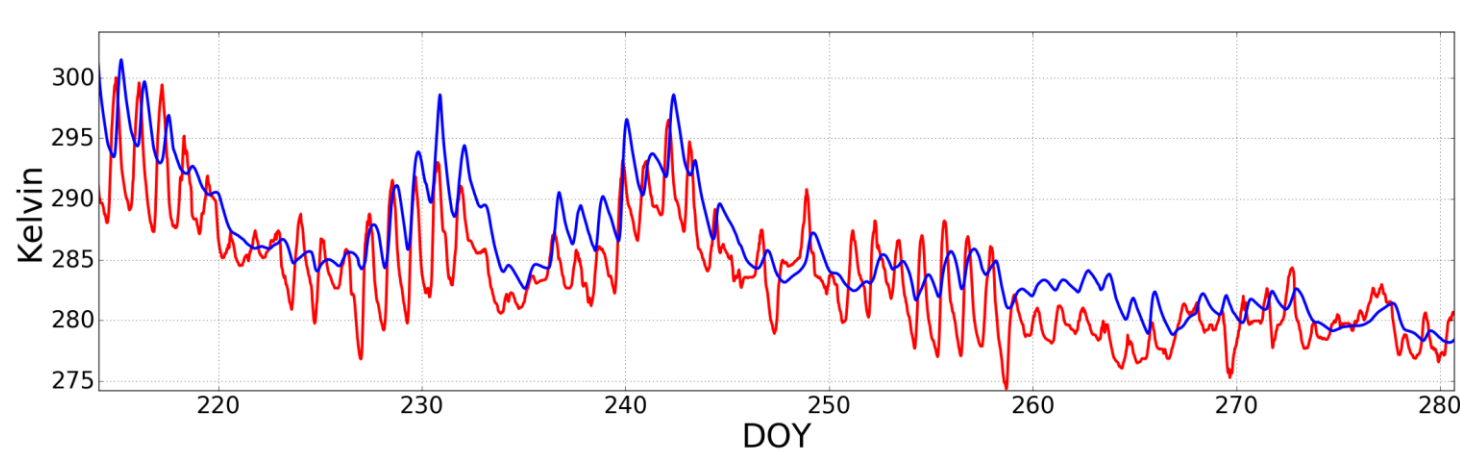
Период наблюдений: с 4 апреля по 31 декабря 2017;

Дискретность - 30 минут.



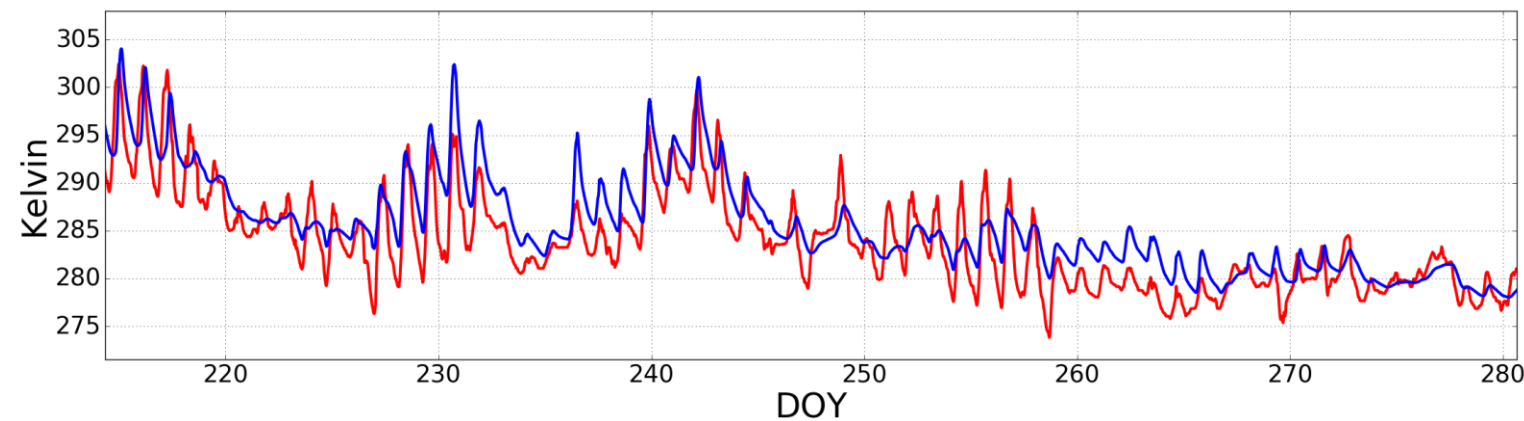
Воспроизведение вертикального распределения температуры в лесу:

14.5 м



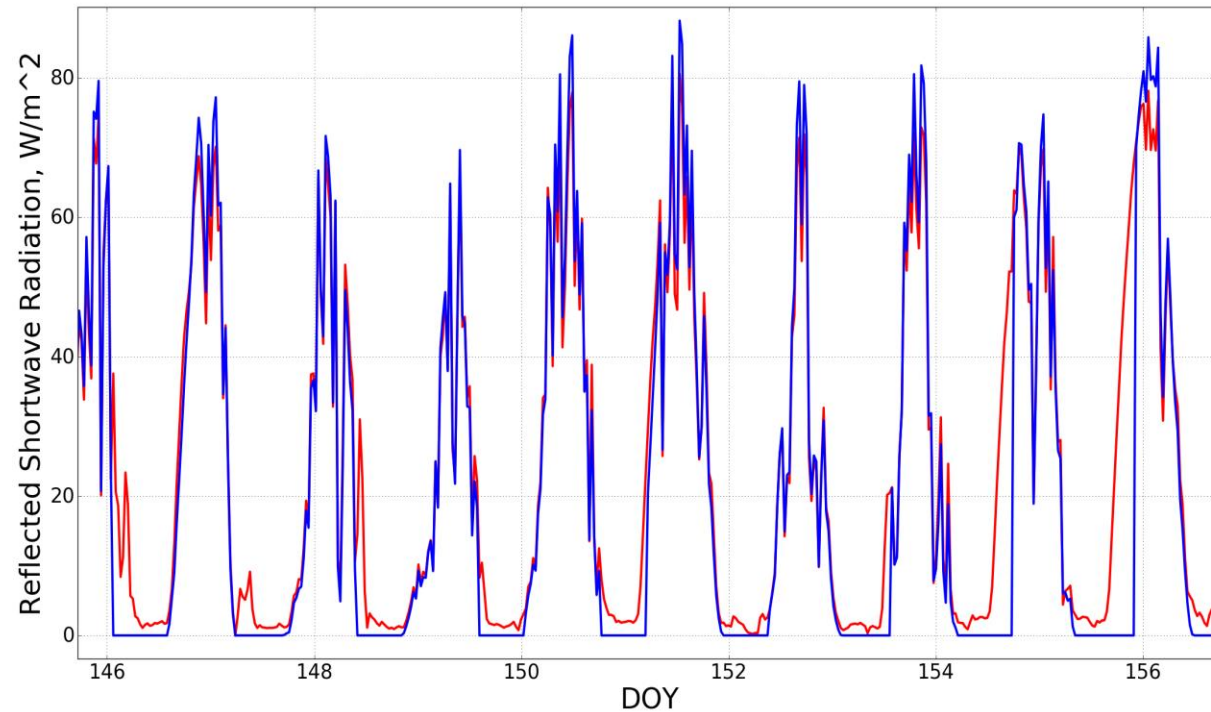
— - результат модели
— - наблюдения

0.5 м



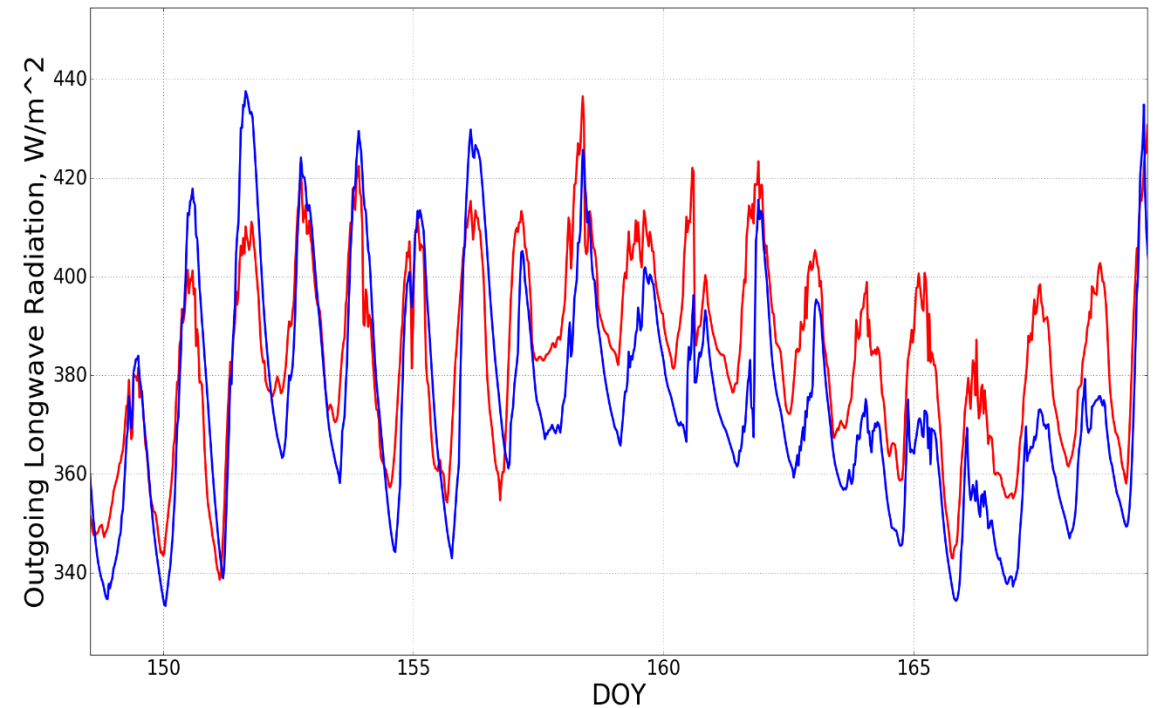
Высота, м	Bias, K	r	Критерий Нэша- Сатклиффа
0.5	2.29	0.91	0.69
1	2.30	0.91	0.67
2	2.22	0.91	0.68
7	2.03	0.92	0.72
14.5	2.09	0.93	0.76

Отображение восходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации над лесом:



<i>Bias</i> , Вт/м ²	<i>r</i>	<i>Eff</i>
-4.81	0.71	0.4

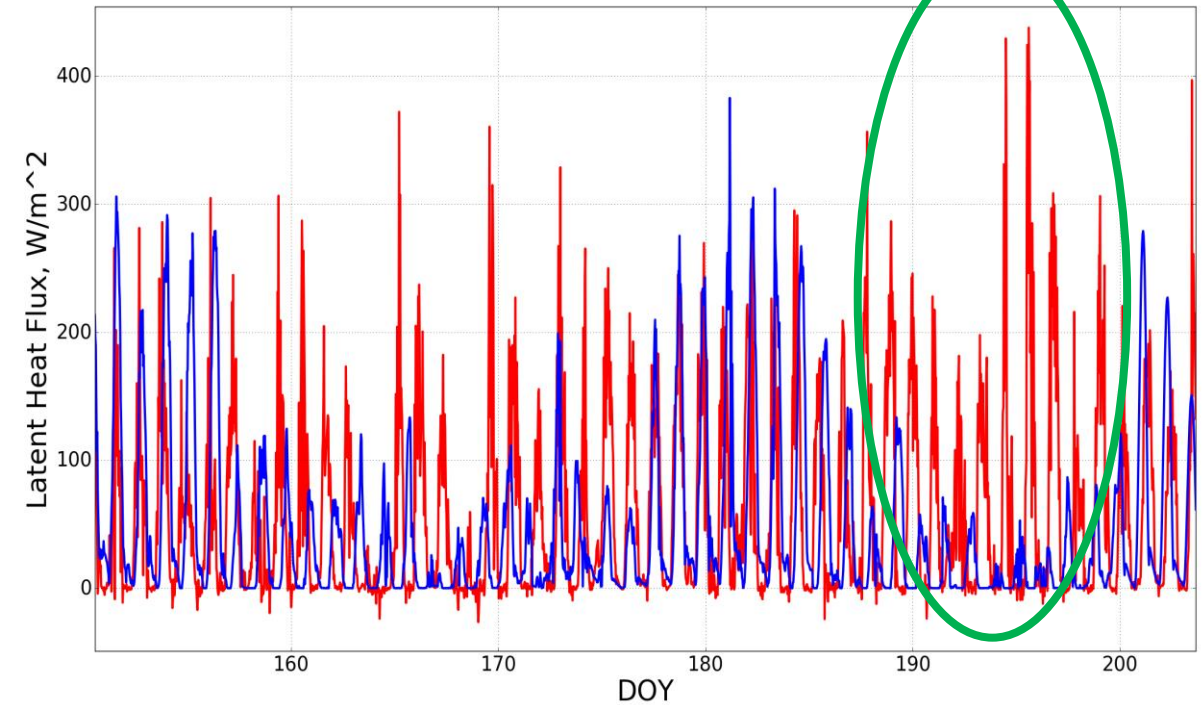
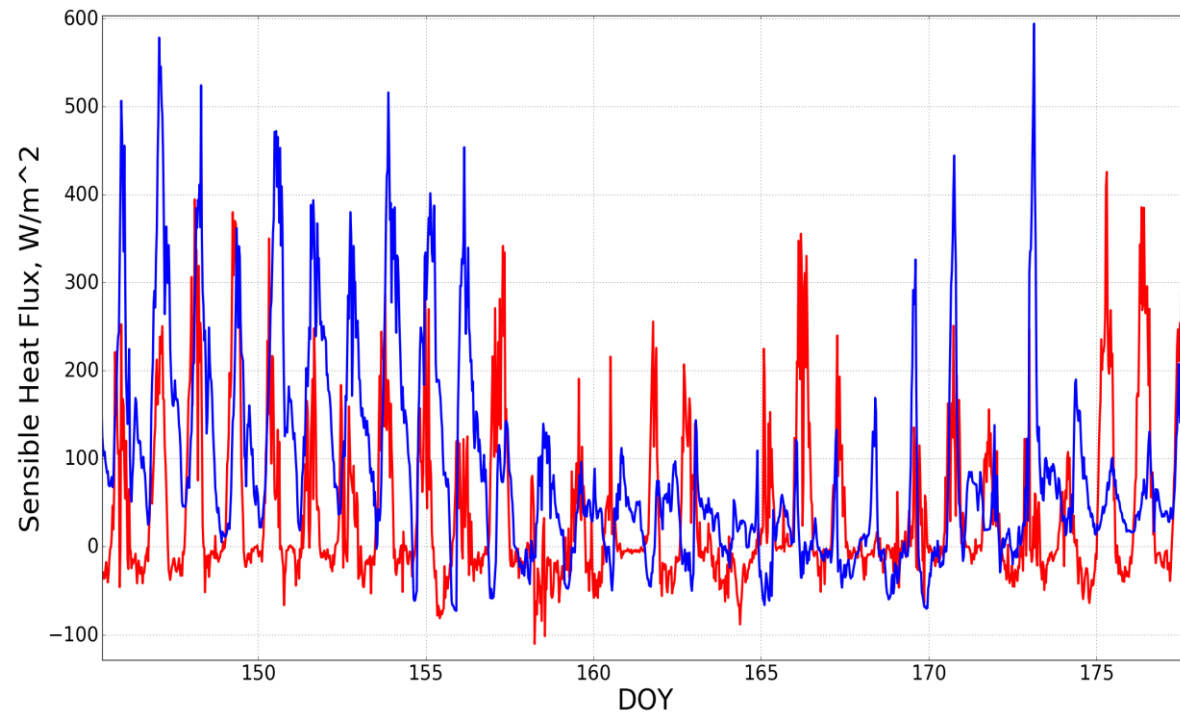
— - результат модели
— - наблюдения



<i>Bias</i> , Вт/м ²	<i>r</i>	<i>Eff</i>
10.9	0.96	0.84

Отображение потоков явного и скрытого тепла над лесом:

Большие погрешности
из-за осадков



$Bias, \text{Вт/м}^2$	r	Eff
19.6	0.26	-0.76

— - результат модели
— - наблюдения

$Bias, \text{Вт/м}^2$	r	Eff
-15.2	0.17	-0.33

Итоги работы и дальнейшие задачи:

Полученные результаты:

1. Был создан прототип модели, воспроизводящий потоки явного тепла и термический режим полога леса;
2. Выполнен численный эксперимент с использованием входных данных из Центрально-Лесного заповедника;
3. Проведены сравнения полученных результатов и полевых измерений;

Задачи:

- Уточнение оптических параметров крон деревьев на основе наблюдений из Центрально-Лесного заповедника;
- Параметризация перехвата осадков растительностью и их дальнейшего испарения.

Список литературы:

- Flerchinger G. N. and Pierson F. B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agric. For. Meteorol.*, 56:227–246, 1991.
- Zhao W. and R. J. Qualls. A multiple-layer canopy scattering model to simulate shortwave radiation distribution within a homogeneous plant canopy. *Water Resour. Res.*, 41, 2005. W08409.