

Усовершенствование расчета испарения с поверхности суши в модели деятельного слоя суши TerM (ИВМ РАН — МГУ)

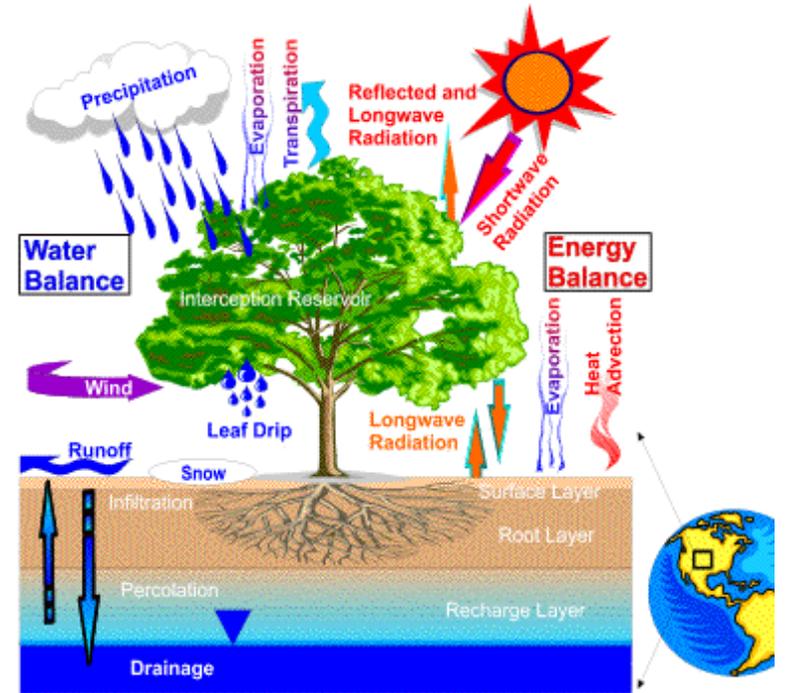
Медведев А.И.^{1,2}, Степаненко В.М.^{1,3,4}, Богомоллов В.Ю.⁵

1 — НИВЦ МГУ, 2 — ИВП РАН, 3 — Географический ф-т МГУ, 4 — Московский центр фундаментальной и прикладной математики, 5 — ИМКЭС СО РАН

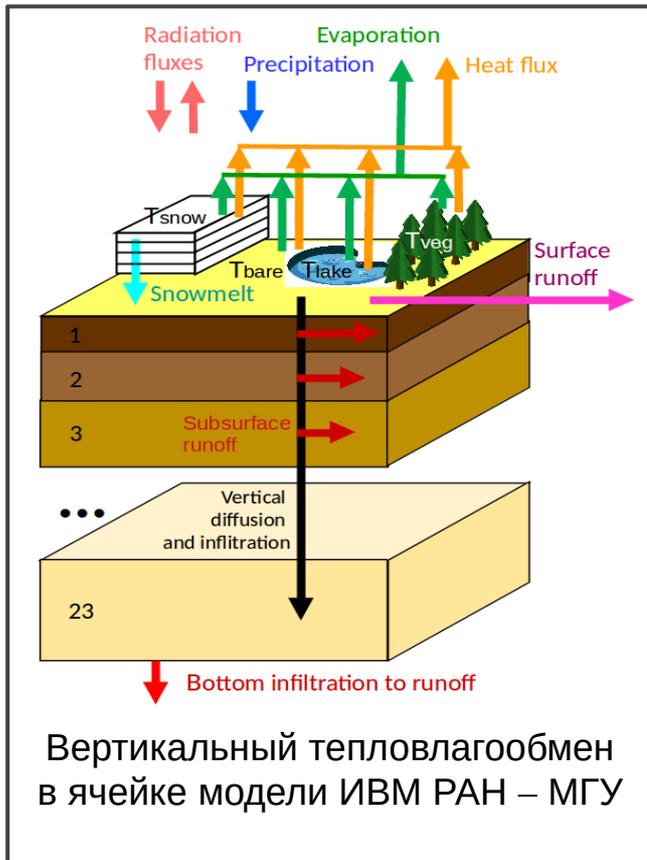
Модель TerM (ИВМ РАН — МГУ)

- Модель TerM — численная модель деятельного слоя суши; разрешение по пространству $0.5 \times 0.5^\circ$, по времени от 1 часа до 1 суток
- Представляет собой блок суши из состава модели Земной системы INMCM, реализованный в виде самостоятельной модели
- Форсинг: ERA5/данные наблюдений

Land Surface Modeling Concept



Система уравнений модели TerM



- Одномерная система уравнений тепловлагопереноса в почвенной колонке:

$$\frac{\partial \rho_g c T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \delta_W^T \frac{\partial \rho_g W}{\partial z} + \delta_V^T \frac{\partial \rho_g V}{\partial z} \right) \right] - L_f F_f - L_e F_e,$$

$$\frac{\partial \rho_g W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_W \left(\frac{\partial \rho_g W}{\partial z} + \delta_T^W \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma \right] - F_f - F_e - \beta \cdot s_1 \max [E_1, 0] - \hat{Y}_g,$$

$$\frac{\partial \rho_g V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_V \left(\frac{\partial \rho_g V}{\partial z} + \delta_T^V \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + F_e,$$

$$\frac{\partial \rho_g I}{\partial t} = F_f$$

T — температура
 W — водность
 I — льдистость
 V — содержание водяного пара

- Граничное условие на поверхности: тепловой и водный баланс

Параметризация испарения

$$E = \sum_{n=1}^{11} s_{1,n} \frac{q - q_{s,1}}{r_a + r_{c,n}} + \sum_{i=2}^5 s_i \frac{q - q_{s,i}}{r_a}$$

s_i — доли ячеек, занимаемые i -м типом земного покрова

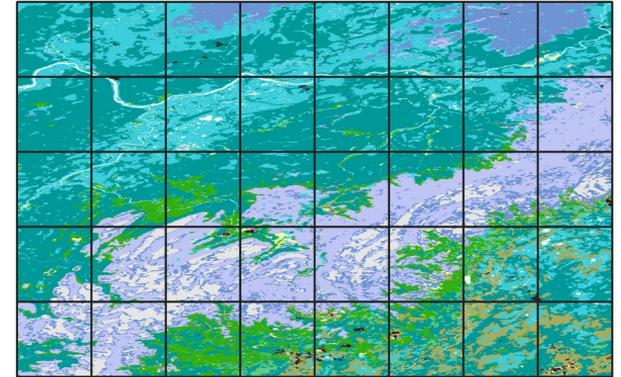
$s_{1,n}$ — доли ячеек, занимаемые n -м подтипа растительности (1-го типа земного покрова)

q — удельная влажность воздуха в приземном слое атмосферы, г/г;

q_s — удельная влажность воздуха над поверхностью, г/г

r_a — аэродинамическое сопротивление

$r_{c,n}$ — устьичное сопротивление n -го подтипа растительности



мозаичный подход на сетке 0.5°

Типы земного покрова:

$i=1$ — растительность (сухие кроны)

$i=2$ — открытый грунт

$i=3$ — растительность (мокрые кроны)

$i=4$ — снежный покров

$i=5$ — водоемы

Анализ параметризации испарения

1) $s_{i, n}$, $s_{1, n}$ — **веса осреднения по типам земного покрова**

$$s_1 = \sum s_{1, n}, \quad s_1^* = \sum s_{1, n}^*, \quad s_{1, n} = s_{1, n}^* (1 - f_4) (1 - f_3)$$

$$s_2 = s_2^* (1 - f_4)$$

$$s_3 = s_1^* (1 - f_4) f_3$$

$$s_4 = (1 - s_5^*) f_4$$

$$s_5 = s_5^*$$

$$f_3 = \frac{W_{sk}}{H_{sk} \sum_{n=1}^{11} w_{1, n}^* L_{tot, n}}, \quad f_4 = \max \left[1, \frac{S}{S_{cr}} \right]$$

$s_{i, n}^*$ - значения по карте земного покрова

классы 3 (мокрая листва) и 4 (снежный покров) обладают динамикой

3) r_a — аэродинамическое сопротивление, с/м

$$r_a = \frac{f_u(\zeta, Z) f_q(\zeta, Z, B) Sc_T}{z^2 u} \quad \zeta = Ri \frac{\alpha_0 f_u^2(\zeta, Z)}{f_q(\zeta, Z, B)}, \quad Ri = \frac{2gz(\theta_v - \theta_{v, s})}{u^2(\theta_v + \theta_{v, s})}$$

применяется теория подобия Моница-Обухова

f_u , f_q — безразмерные профили скорости ветра и влажности

$\zeta = z/L$ (L — турбулентный масштаб длины Обухова)

Ri — число Ричардсона

$Z = z/z_{0u}$, $B = \ln(z_{0u}/z_{0q})$ (z_{0u} , z_{0q} — **параметры шероховатости для переноса импульса и водяного пара**)

Sc_T — турбулентное число Шмидта

$$E = \sum_{n=1}^{11} s_{1, n} \frac{q - q_{s, 1}}{r_a + r_{c, n}} + \sum_{i=2}^5 s_i \frac{q - q_{s, i}}{r_a}$$

2) $q_{s, i}$ — влажность на поверхности, г/г

$$q_{s, i} = \begin{cases} q_{sat, i}, & i = 1, 3, 4, 5 \\ \max \left[q_{sat, i} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{W_s}{W_{s, max}} \right), q \right], & i = 2 \end{cases}$$

класс 2 (открытый грунт) — зависимость от влажности грунта

4) r_c — интегральное устьичное сопротивление, с/м

$$\frac{1}{r_{c, n}} = \int_0^{L_{tot, n}} \frac{1}{r_{s, n}(F(L))} dL$$

$L_{tot, n}$ — **индекс LAI**

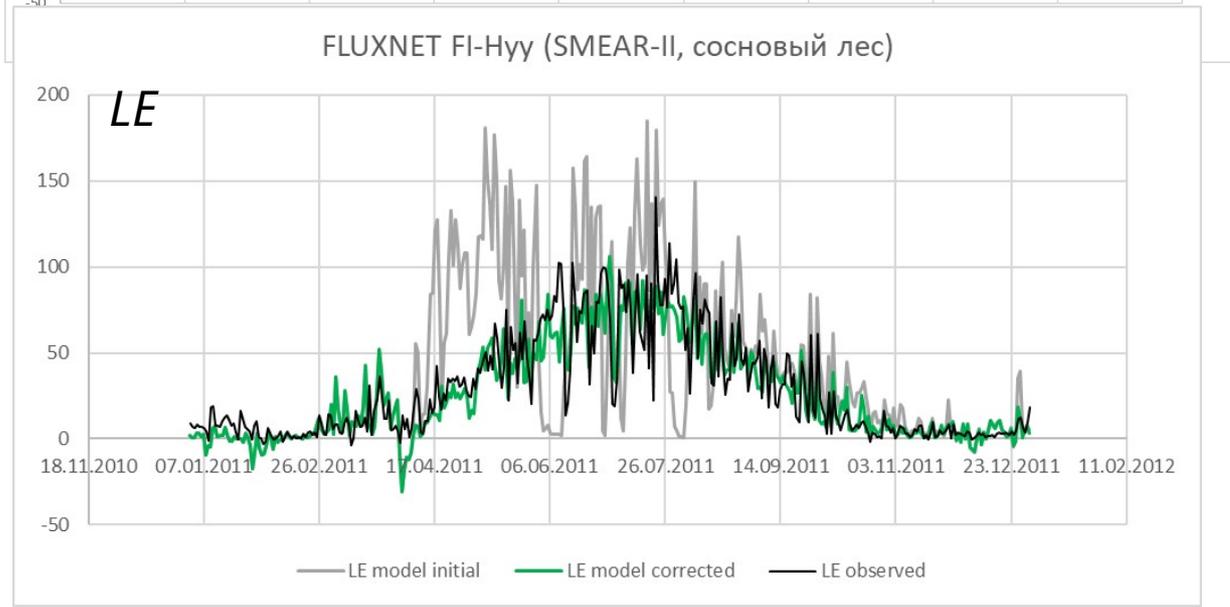
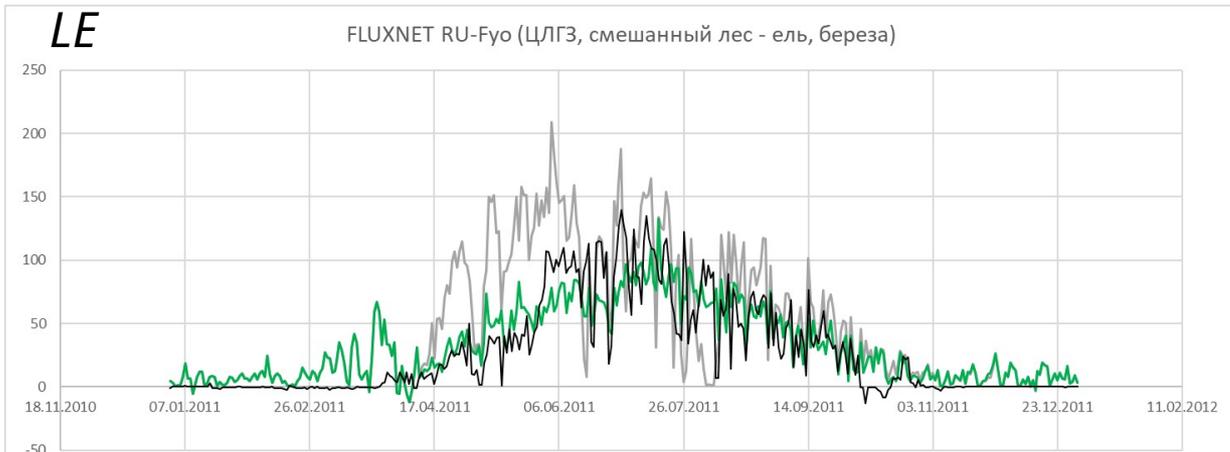
$rs = rs(F)$ — зависимость устьичного сопротивления от ФАР, м/с

$$\frac{1}{r_{s, n}(F)} = \frac{a_n F + b_n}{F + c_n} \cdot f_{T, n}(T) \cdot f_{d, n}(d) \cdot f_{\psi_s, n}(\psi_s)$$

$F = F(L)$ — профиль ФАР в кроне растительности

$$F(L) = F_0 e^{-kL} \quad f_{T, n}, f_{d, n}, f_{\psi_s} — \text{стресс-факторы по температуре, влажности воздуха и влажности почвы}$$

Сравнение модели с FLUXNET



Модификации:

1) убрано численное ограничение на величину коэффициента обмена в приземном слое (u — приземная скорость ветра)

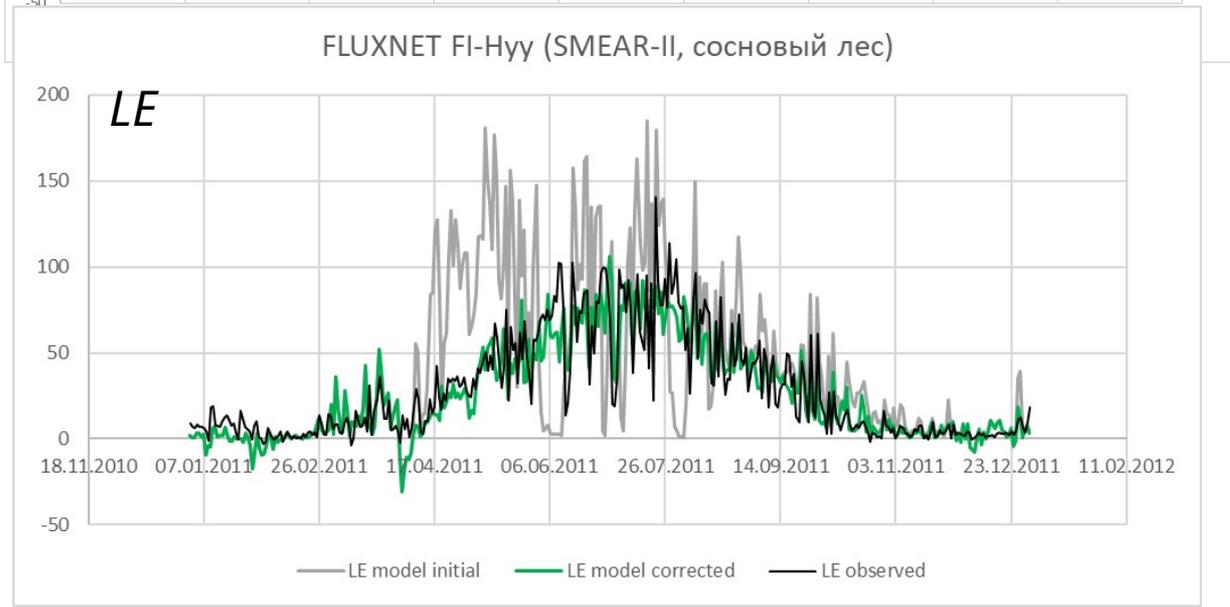
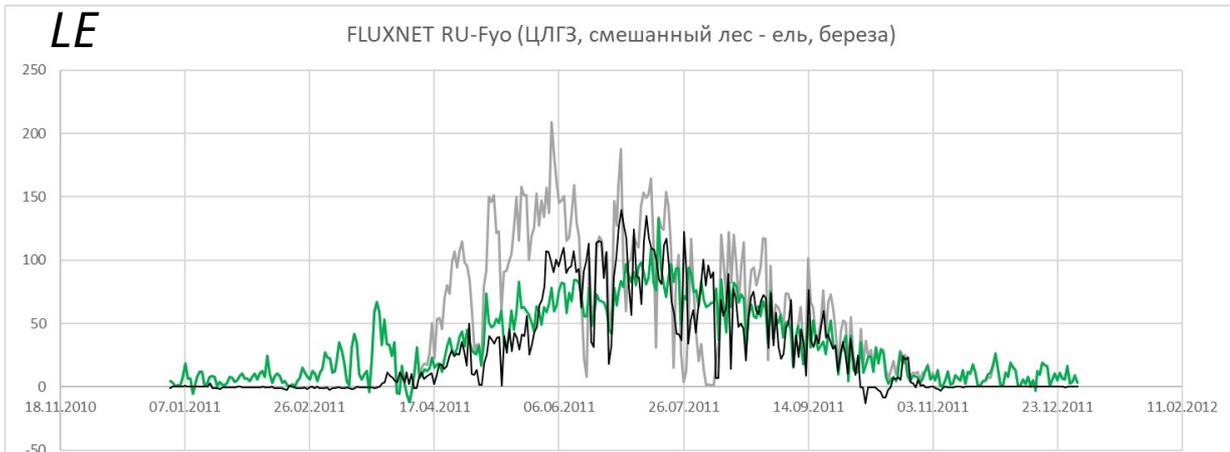
$$C_{\theta} < 150/(u \cdot \Delta t)$$

2) введена зависимость z_{0u} от типа земного покрова вместо зависимости от высоты рельефа H , м

$$z_{0u} = 0.2 + H/50000$$

— наблюдения
— модель (было)
— модель (стало)

Сравнение модели с FLUXNET



Модификации:

3) убрана динамика LAI и площади растительности в зависимости от влажности и температуры почвы

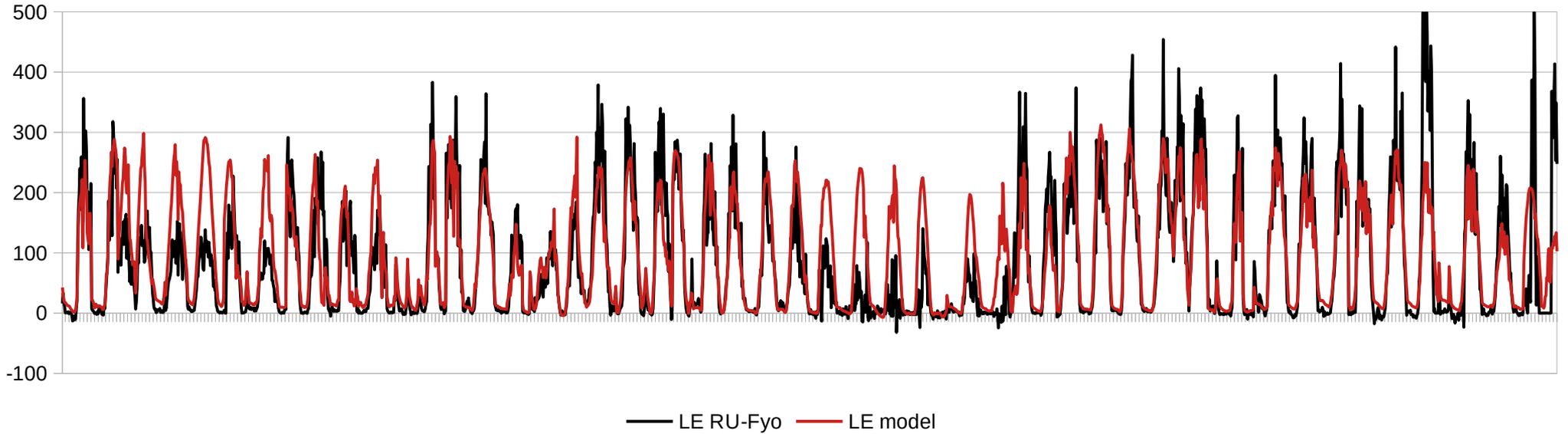
$$\mu_i = \mu_{i, \max} \mu(W), \quad Lt_i = Lt_{i, \max} \mu(W) \mu(T).$$

4) уменьшена чувствительность устьичного сопротивления к влажности почвы

$$F_w = \frac{W_r - W_w}{W_b - W_w},$$

— наблюдения
— модель (было)
— модель (стало)

Воспроизведение временного хода потока скрытого тепла (LE) на станции FLUXNET — Федоровское, Вт/м²



Обработка данных пульсационных измерений

- Летние месяцы, фильтрация по признакам качества, замыканию радиационного баланса, времени без осадков > 24 часов
- Расчет излучательной способности поверхности (ε) в предположении равенства температуры воздуха и яркостной температуры поверхности при утреннем / вечернем переходе потока явного тепла (H), в моменты времени t , когда

$$H_{t-1} > H_t > 0 > H_{t+1} > H_{t+2} \quad \text{или} \quad H_{t-1} < H_t < 0 < H_{t+1} < H_{t+2}$$

затем линейная интерполяция ε внутри суток

- Корректировка значений H и LE по замыканию теплового баланса по стандартной методике FLUXNET: 1) расчет коэффициентов k в полуденные/полуночные часы, 2) расчет месячного скользящего среднего k , 3) умножение H и LE на средний k

$$k = \frac{R - B}{H + LE}$$

R — радиационный баланс, B — поток тепла в почву, H — поток явного тепла, LE — поток скрытого тепла, Вт/м²

Оценка масштабов величины сопротивлений

$$E = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \rho \frac{q - q_{s,i}}{r_a + r_{c,i}}$$

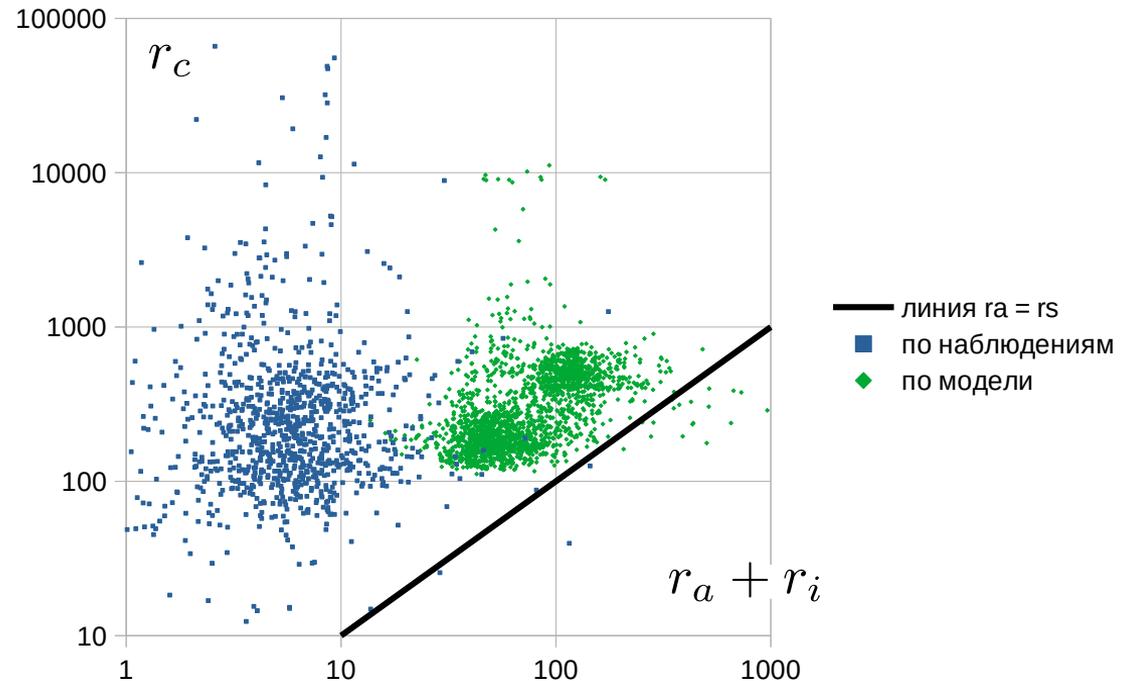
Расчет из данных FLUXNET:

r_a — аэродинамическое сопротивление:

$$r_a + r_i = \frac{1}{c_p \rho} \frac{H}{\theta - \theta(T_s)}$$

r_c — устьичное сопротивление:

$$r_c = \frac{1}{L \rho} \frac{LE}{q - q_{sat}(T_s)} - r_a - r_i$$



Всюду $r_s \gg r_a$

Сравнение испарения с поверхности речных бассейнов



Крупные реки Северная Двина, Печора, Мезень, Онега, а также 30 «средних» по площади водосборов (4–28 тыс. км² ≈ 1–2°)

- смешанные леса
- хвойные вечнозеленые леса
- редколесье (болота, лесотундра)
- тундра кустарниковая, кустарничковая
- тундра травянистая

1) Обновление карты поверхности

Исходные данные – Wilson & Henderson-Sellers 1985

Альтернативные: глобальные: GLCC для России: карта ИКИ РАН

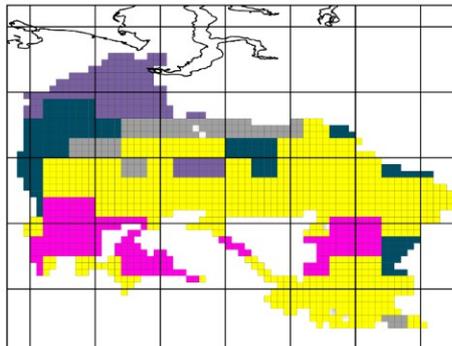
Используется система препроцессинга TerMPS

Сравнение карт Wilson-Henderson-Sellers и GLCC (бассейн р. Обь)

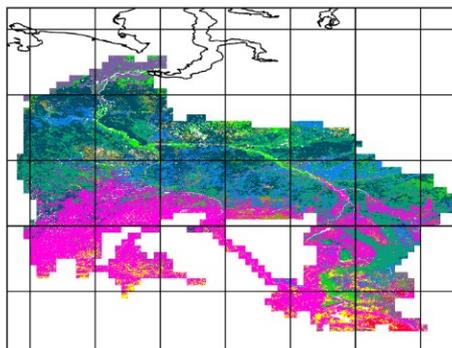
Land cover types

- glaciers
- broadleaf evergreen forest
- broadleaf deciduous forest
- mixed forest
- taiga
- taiga (larch)
- savannah
- steppe
- closed shrubland
- open shrubland
- tundra
- bare ground
- crops
- water
- wetlands (GLCC only)

Wilson & Henderson-Sellers map

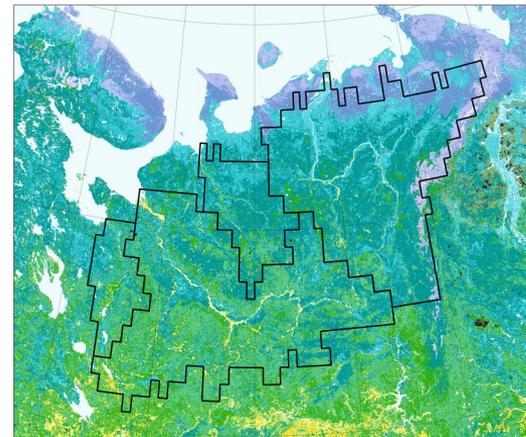


GLCCv2 map

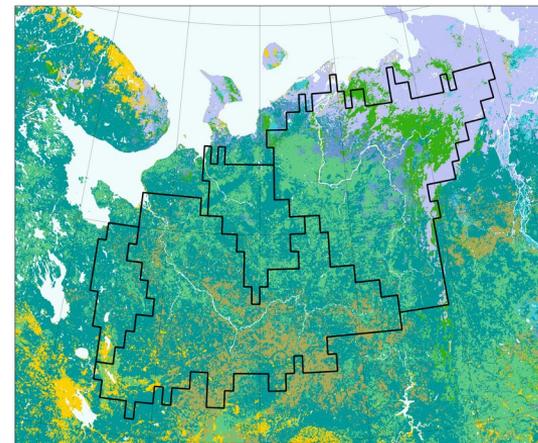


Сравнение карт ИКИ РАН и GLCC (бассейны р. Северная Двина, Печора)

Карта растительности России (ИКИ РАН)



Карта GLCC



2) Изменение параметров LAI

Исходно – LAI для i -го типа растительности зависит от влажности и температуры почвы

$$L t_i = L t_{i, \max} \mu(W) \mu(T).$$

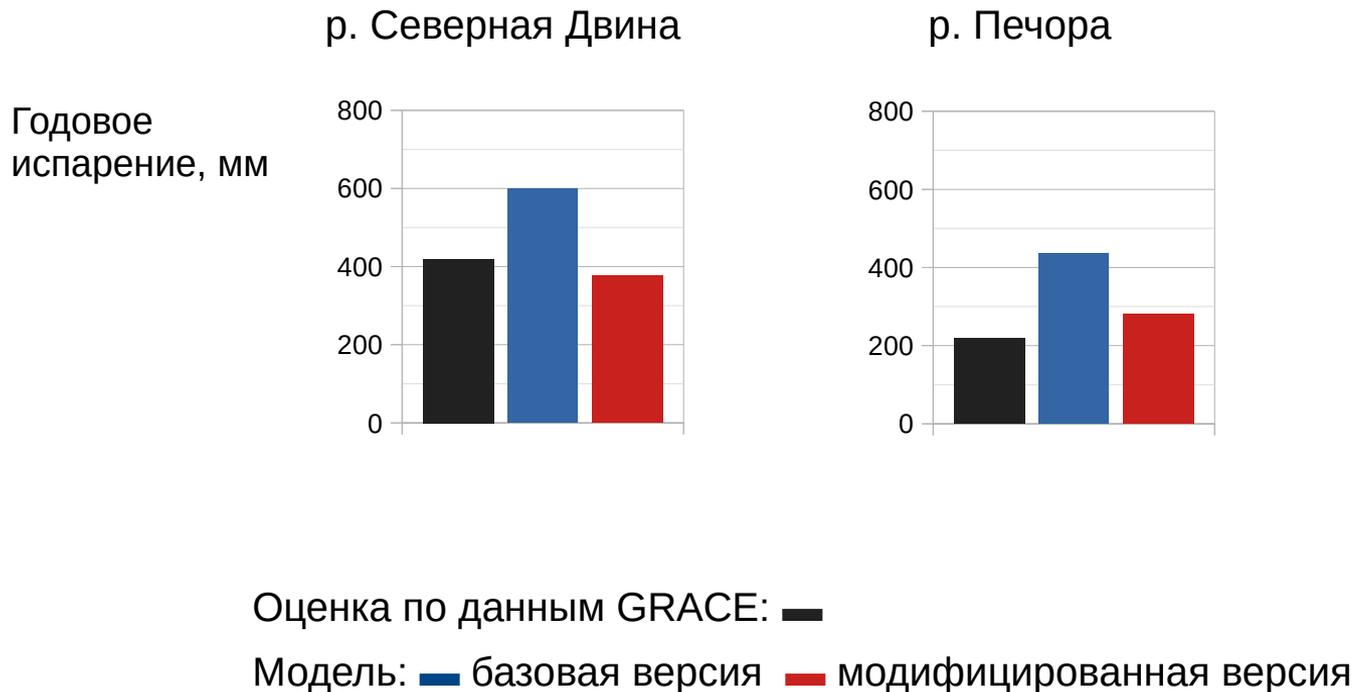
Модификация: карта месячных значений LAI (данные MODIS)

3) Полноценная реализация мозаичного подхода

Исходно – смесь агрегирования по значениям и по параметрам при осреднении величин по типам земного покрова в ячейке

Модификация: повсеместно реализовано агрегирование по значениям

Сравнение испарения с поверхности речных бассейнов



Оценка испарения по уравнению водного баланса

- Данные P — GPCP, Y — Росгидромет, W' — GRACE (2002-2019)
- W' (аномалии влагозапасов) с месячным разрешением. Расчет ΔW и сглаженных месячных значений P и Y по следующей схеме:

$$\Delta \widetilde{W}_m \approx \frac{1}{2} (W'_{m+1} - W'_{m-1}) \approx \frac{1}{2n_d} \sum_{d=1}^{n_d} (W'_{m+1,d} - W'_{m-1,d})$$

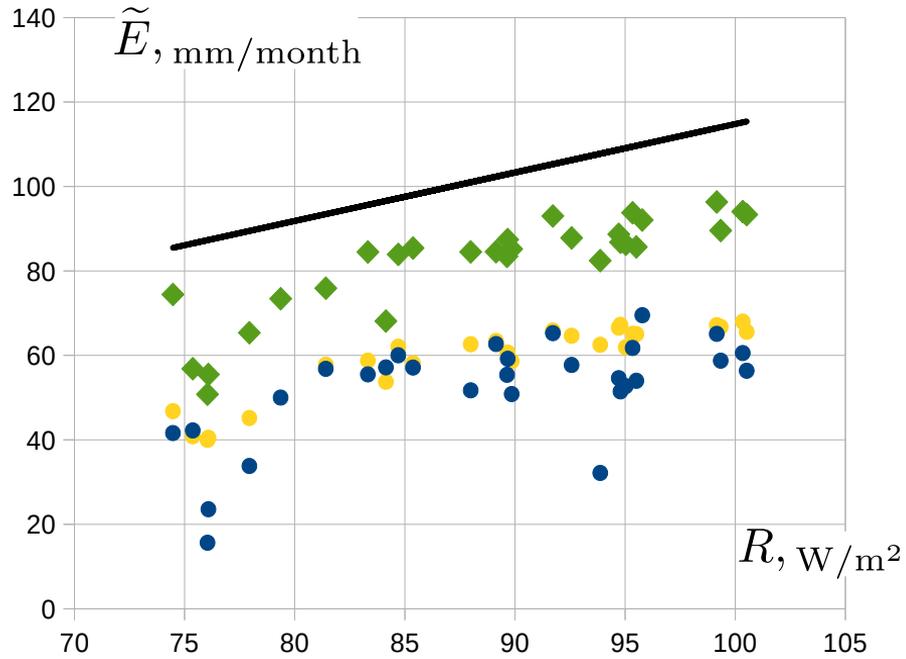
$$\widetilde{X}_m = \frac{1}{2n_d} \sum_{d=1}^{n_d} \sum_{t=t_{m-1,d}}^{t_{m+1,d}} X_t$$

где m – номер месяца, d – номер суток, n_d – число дней в месяце, t – время, X – переменная P , Y или E (мм)

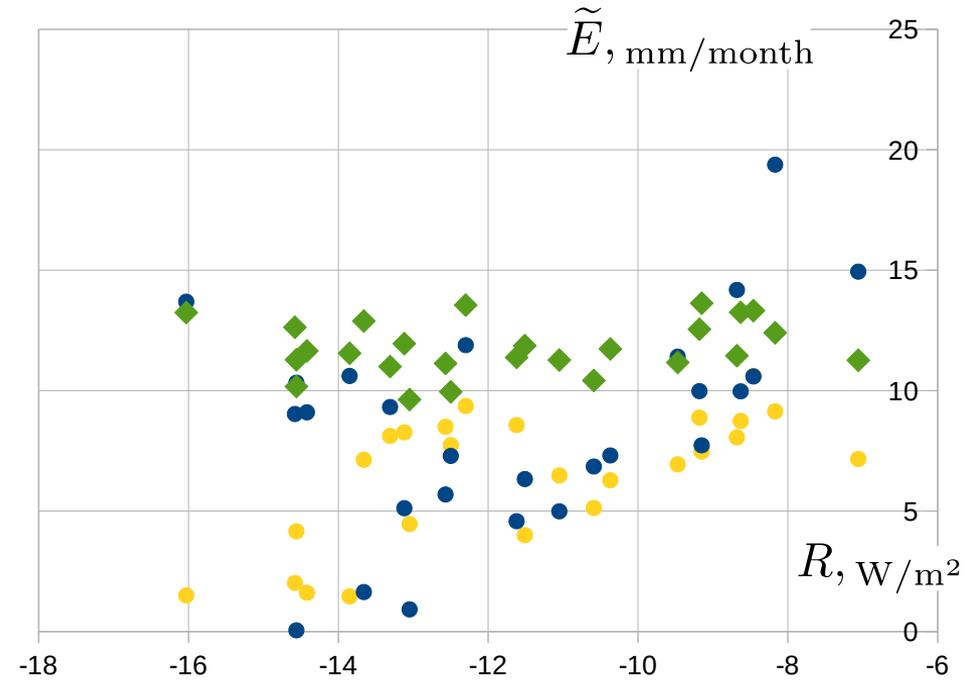
$$\widetilde{E} = \widetilde{P} - \widetilde{Y} - \Delta \widetilde{W} \quad \text{— в таком виде баланс в уравнении замыкается}$$

Сравнение испарения с поверхности небольших водосборов (было)

ЛЕТО



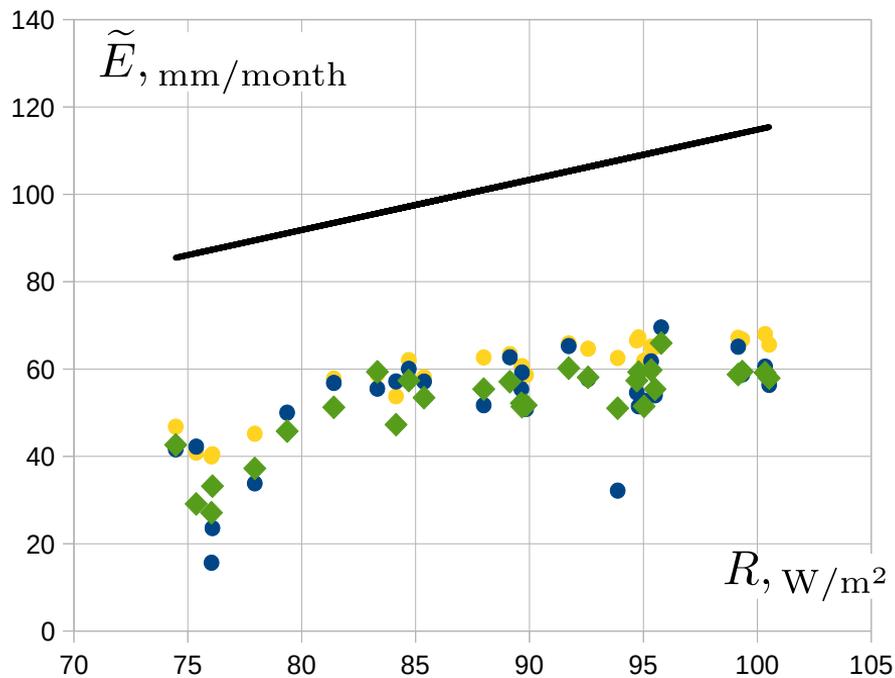
ЗИМА



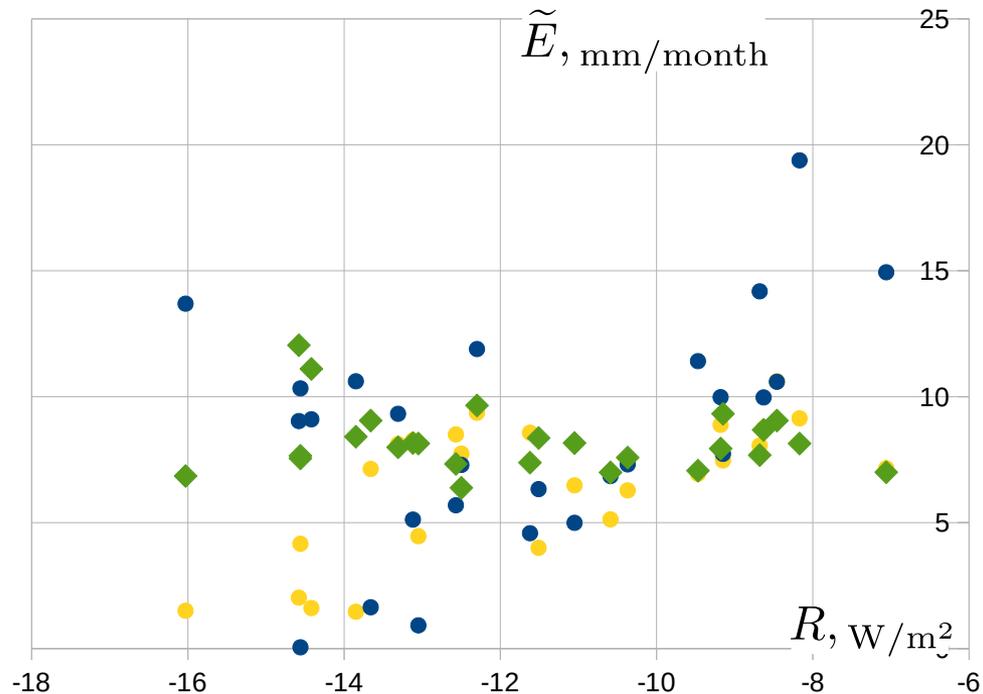
■ модель ■ оценки по УВБ ■ ERA5 — теоретическая испаряемость

Сравнение испарения с поверхности небольших водосборов (стало)

ЛЕТО

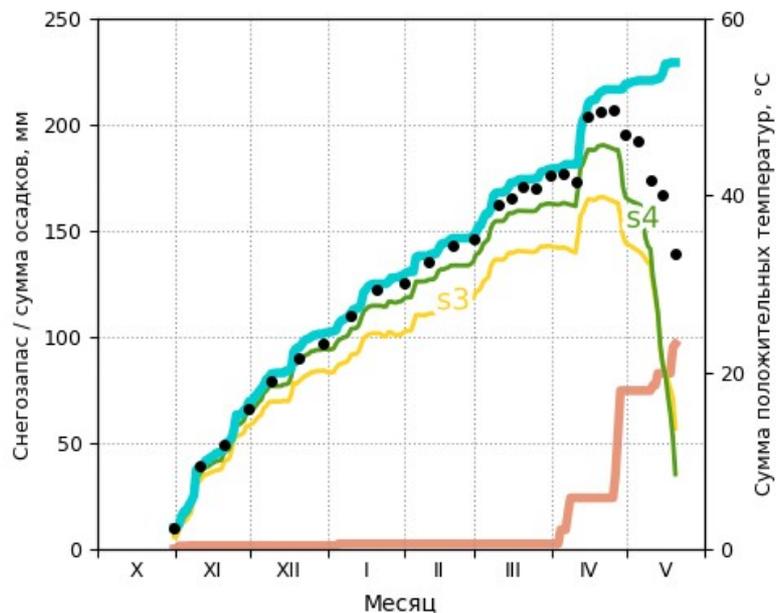


ЗИМА



■ модель ■ оценки по УВБ ■ ERA5 — теоретическая испаряемость

Испарение с поверхности снежного покрова



Обозначения:

— накопленная
сумма осадков [мм]

— накопленная
сумма
положительных
температур воздуха
[°C]

• снеготаяние по
данным наблюдений
[мм]

—, — снеготаяние по
результатам расчета
модели [мм]

На графике приведен график динамики снеготаяния для зимы 2015-16 на станции Петрунь (респ. Коми)

В течение данной зимы единственным стоком снега является испарение

mod (s3) = расчет с предшествующими модификациями

mod (s4) = mod (s3) с дополнительной модификацией термической шероховатости

Модификация параметризации термической шероховатости

а) исходная параметризация $B = \ln(z_{0u}/z_{0T})$ Казакова–Лыковского:

$$B = \min[B', B_{max}]; \quad B' = \begin{cases} c_0 & \text{Re}_{0u} \in [0; \text{Re}_{min}) \\ c_1 \ln(\text{Re}_{0u}) + c_2, & \text{Re}_{0u} \in [\text{Re}_{min}; \text{Re}_{max}) \\ c_3 (\text{Re}_{0u})^{0.45}, & \text{Re}_{0u} \in [\text{Re}_{max}; +\infty) \end{cases}$$

$$\text{Re}_{0u} = \frac{u_* z_{0u}}{\nu} \quad B_{max} = 2$$

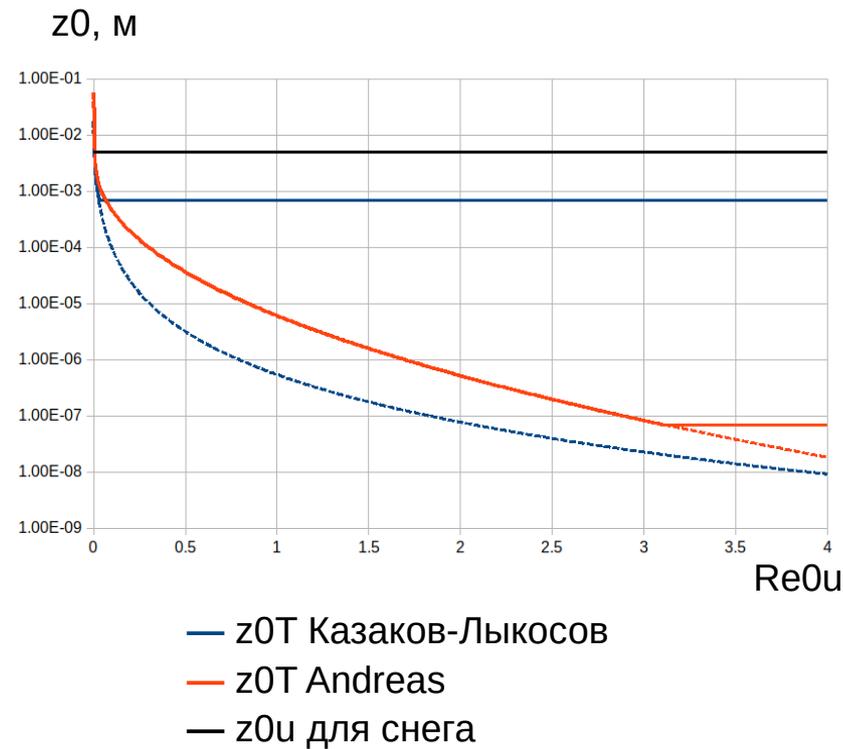
б) альтернативная параметризация $B = \ln(z_{0u}/z_{0T})$ Andreas для гладкой поверхности снега:

$$B = \min[B', B_{max}]$$

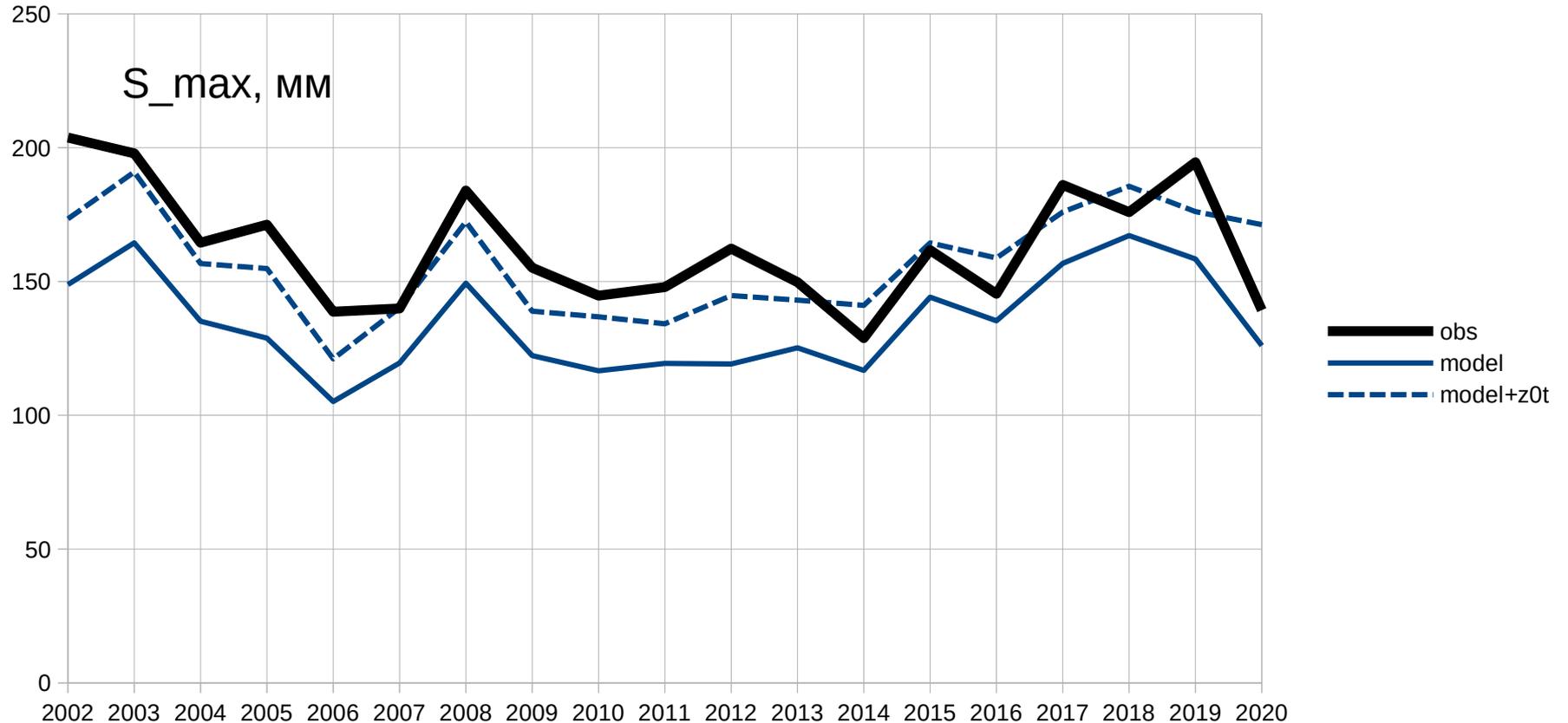
$$B' = \begin{cases} c_0 & \text{Re}_{0u} \in [0; \text{Re}_{min}) \\ c_1 \ln(\text{Re}_{0u}) + c_2, & \text{Re}_{0u} \in [\text{Re}_{min}; \text{Re}_{max}) \\ c_3 (\ln(\text{Re}_{0u}))^2 + c_4 \ln(\text{Re}_{0u}) + c_5, & \text{Re}_{0u} \in [\text{Re}_{max}; +\infty) \end{cases}$$

$$\text{Re}_{0u} = \frac{u_* z_{0u}}{\nu}, \quad B_{max} = \ln \frac{z_{0u}}{z_{0q,min}}$$

$$B_{max} \approx 11.2$$



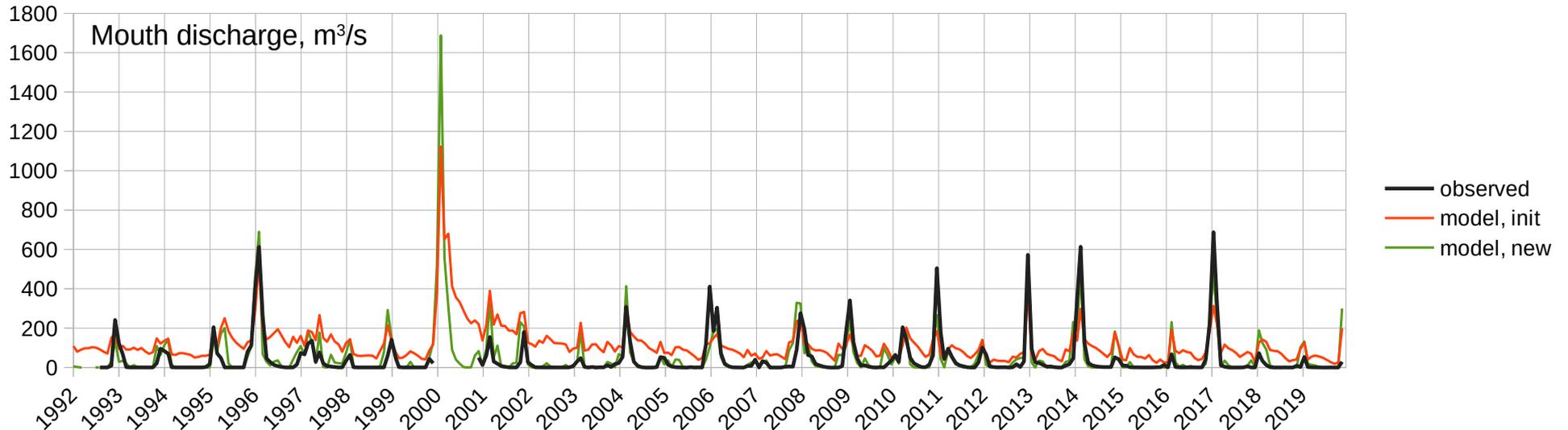
Максимальные годовые снеготпасы S_{max} (среднее по 14 станциям)



Учет испарения с поверхности рек

Расчет для р. Лимпопо (ЮАР)

В сухой период значительную роль играет испарение с поверхности рек



Заключение

- модификации параметризаций для корректного расчета потоков в точке
- обновление карт параметров для глобальных расчетов
- модификация параметризации z_0t
- учет испарения с поверхности рек

Спасибо за внимание!