

Моделирование углеродного цикла болот в модели TerM

Богомолов В.Ю.^{1,2,3}, Рязанова А.А.¹, Степаненко В.М.^{2,4}, Аббазов А.Э.³,
Дюкарев Е.А.^{1,5}, Голубец Д.И.¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

²Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

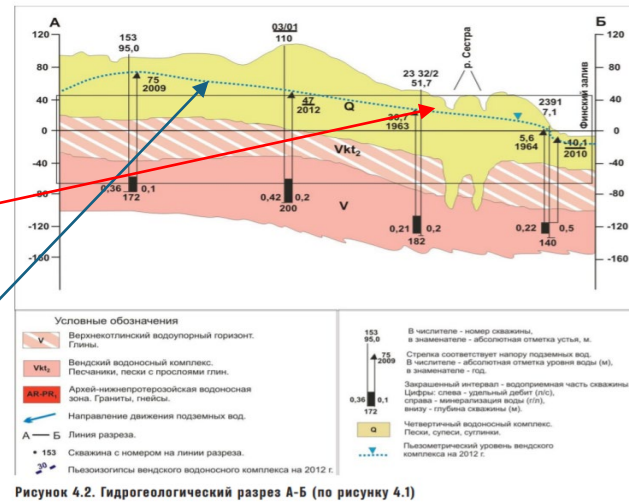
³Геолого-географический факультет Томского государственного университета

⁴Географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

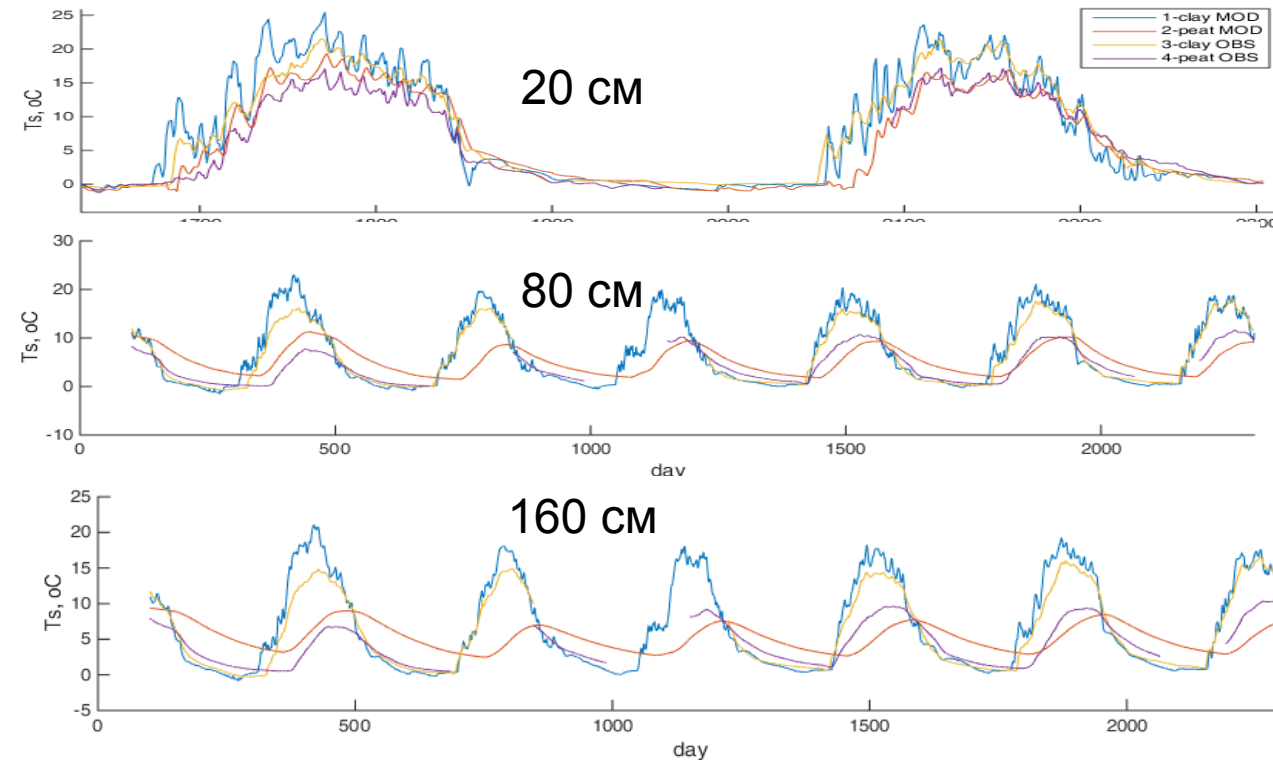
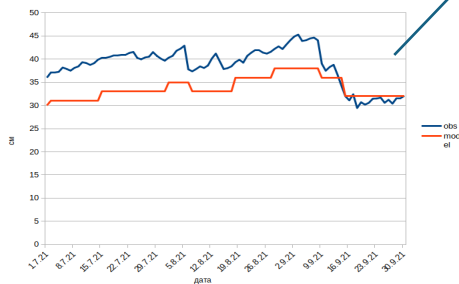
⁵Югорский государственный университет

Необходимая модификация модели TerM для описания болотных экосистем

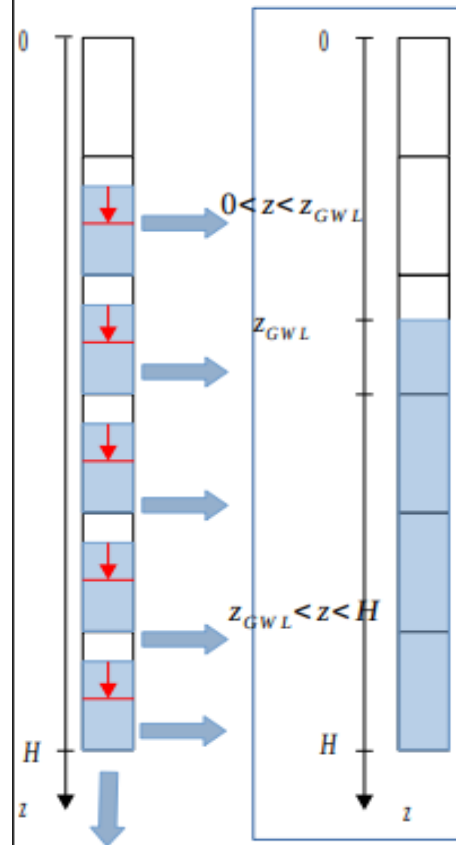
- Описание гидрофизических характеристик торфогрунтов
- Параметризация коэффициента диффузии и гравитационного потока
- Параметризация уровня грунтовых вод, механизм горизонтального стока
- Моделирование потоков метана и **CO₂** в рамках единого цикла углерода



Моделируемый средний УБВ



Измененная схема тепло масса переноса



0 z

0 $z < z_{GWL}$

z_{GWL}

Не насыщенная область

$z_{GWL} < z < H$

Область насыщения

H z

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_i - R_f - Y_g, \\ \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_v \frac{\partial V}{\partial z}, \\ \lambda_w, \gamma \text{ модифицированная модель van Genuchten-Mualem} \\ W = W_{max} \\ V = 0 \\ I = 0 \\ \frac{\partial z_{GWL}}{\partial t} = \left(-\lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} + \gamma \right) \Big|_{z=z_{GWL}} - k_0 \gamma_{max} \left[0, \left(\frac{z_{GWL} - z_p}{R} \right) \right] \end{array} \right. \left. \vphantom{\frac{\partial W}{\partial t}} \right\} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + L_i F_i$$

Модифицированная модель van Genuchten-Mualem

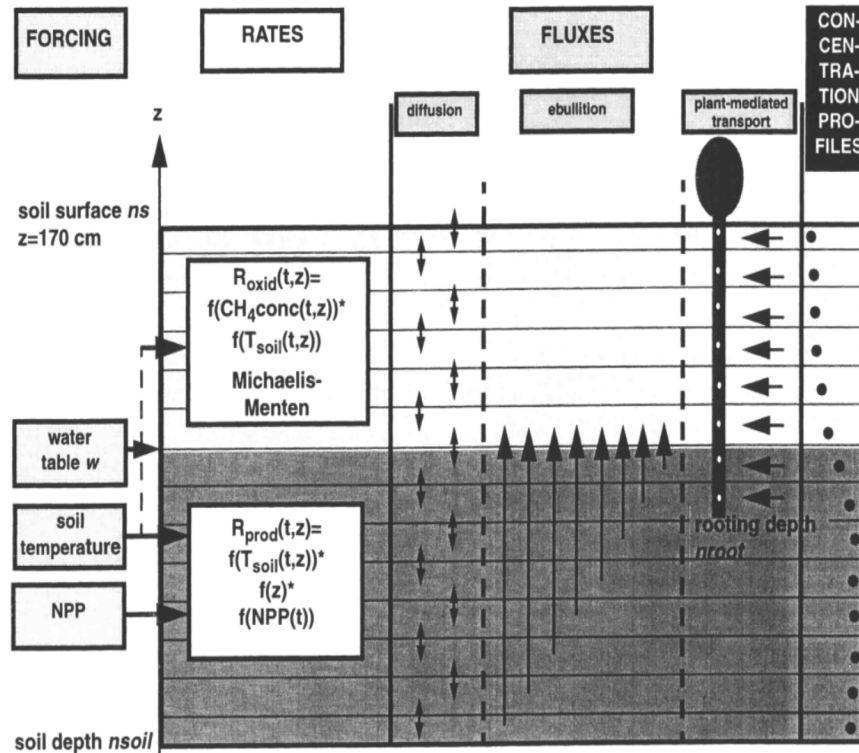
$$W'_{max} = W_r + (W_{max} - W_r) \left(1 + \left| \alpha \psi_{max}^{(1/(1-m))} \right| \right)^m,$$

$$\lambda_w = \gamma_{max} \frac{(1-m)}{\alpha m (W_{max} - W_r)} \theta^{1/2-1/m} \left((1 - \theta^{1/m})^{-m} + (1 - \theta^{1/m})^m - 2 \right), \quad \theta = \frac{W - W_r}{W'_{max} - W_r},$$

$$\gamma = \gamma_{max} \theta \alpha \left(1 - (1 - \theta^{1/m})^m \right)^2, \quad \theta = \frac{W_{max} - W_r}{W'_{max} - W_r} \cdot \frac{W - W_r}{W'_{max} - W_r}, \quad (M. Schaap and M. van Genuchten 2006)$$

Methane emission model from wetland ecosystems in the TerM model

WALTER AND HEIMANN MODELING METHANE EMISSIONS FROM WETLANDS



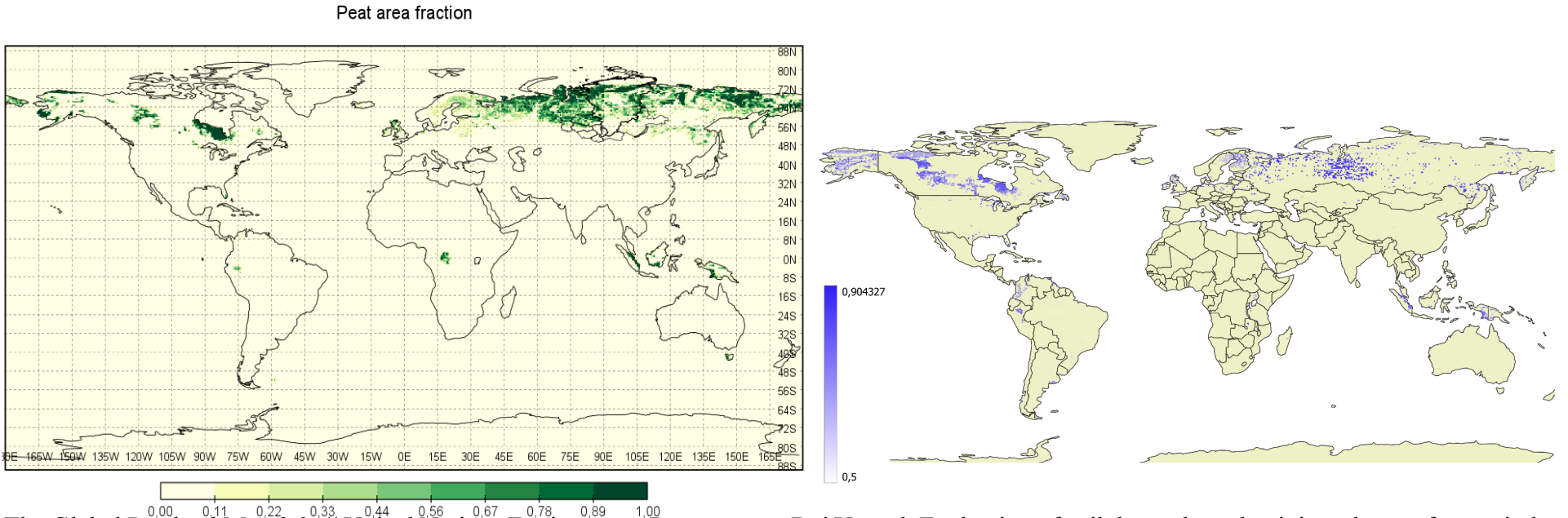
$$f_{in}(t) = 1 + \frac{f_{NPP}(t)}{NPP_{max}}$$

$$R_{prod}(t, z) = R_0 f_{org}(z) f_{in}(t) f(T) Q_{10}^{\frac{T(t, z) - T_{mean}}{10}}$$

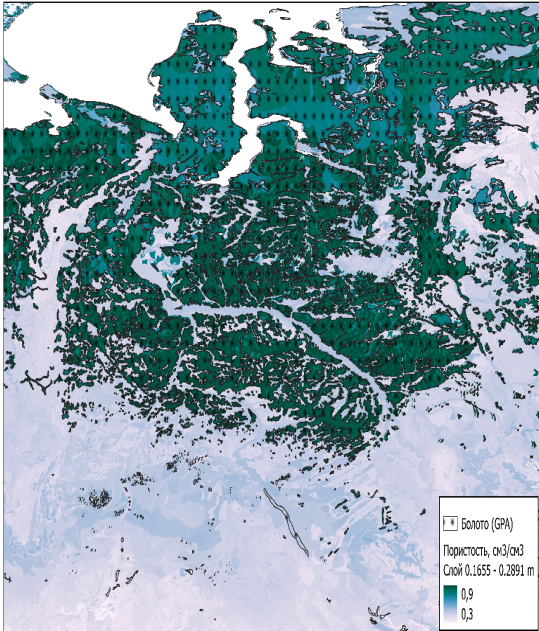
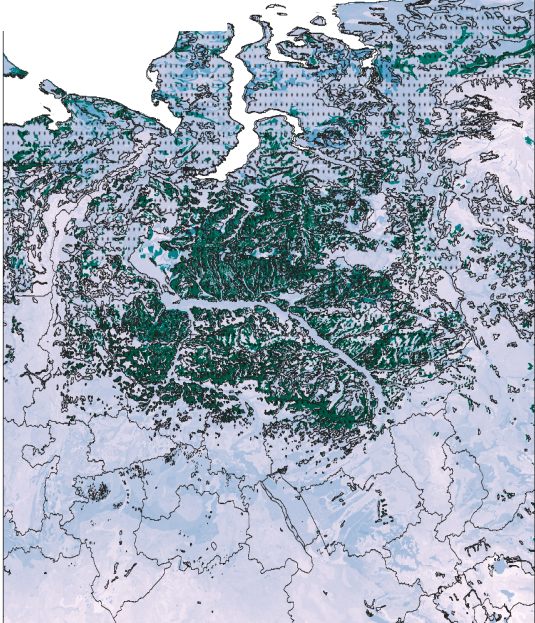
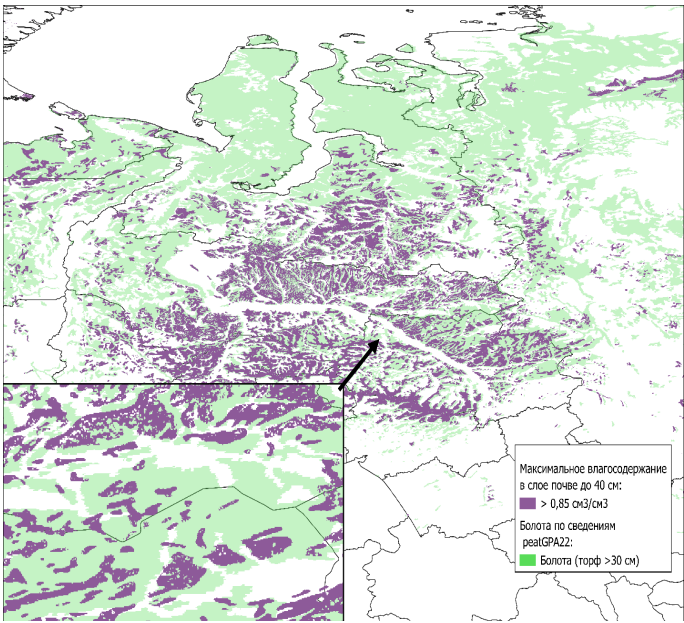
$$F_{tot}(t) = F_{diff}(t, z = u) + F_{ebull}(t) + F_{plant}(t) .$$

Walter, B. P., and Heimann, M. (2000), A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate, *Global Biogeochem. Cycles*, 14(3), 745-765

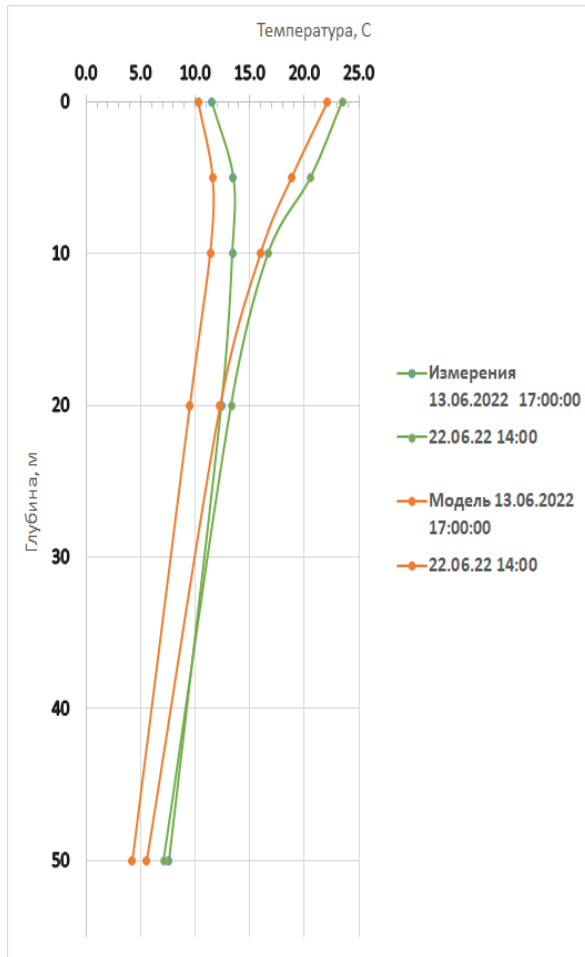
Согласование карты распределения болот и почвенной базы



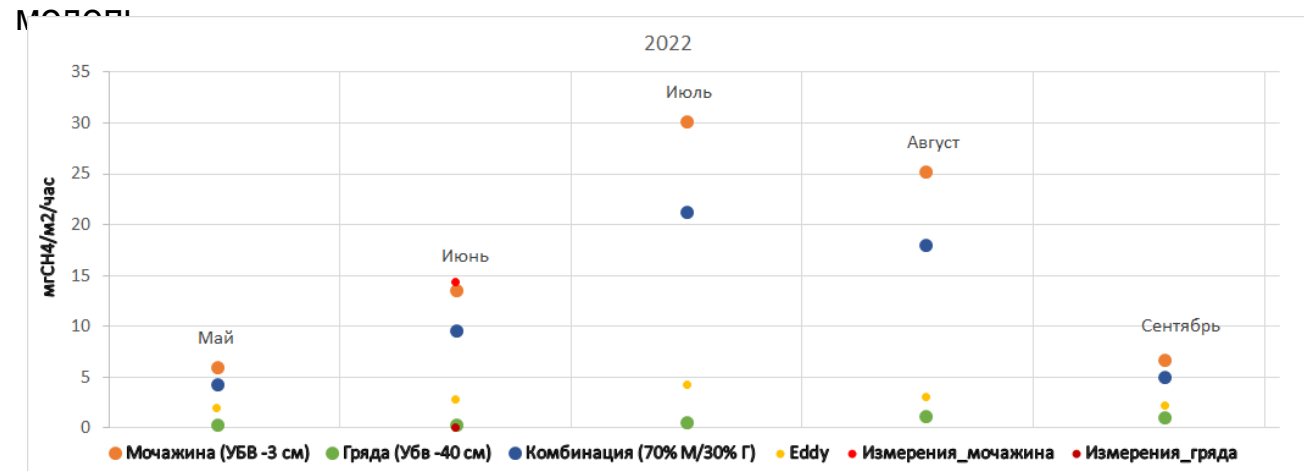
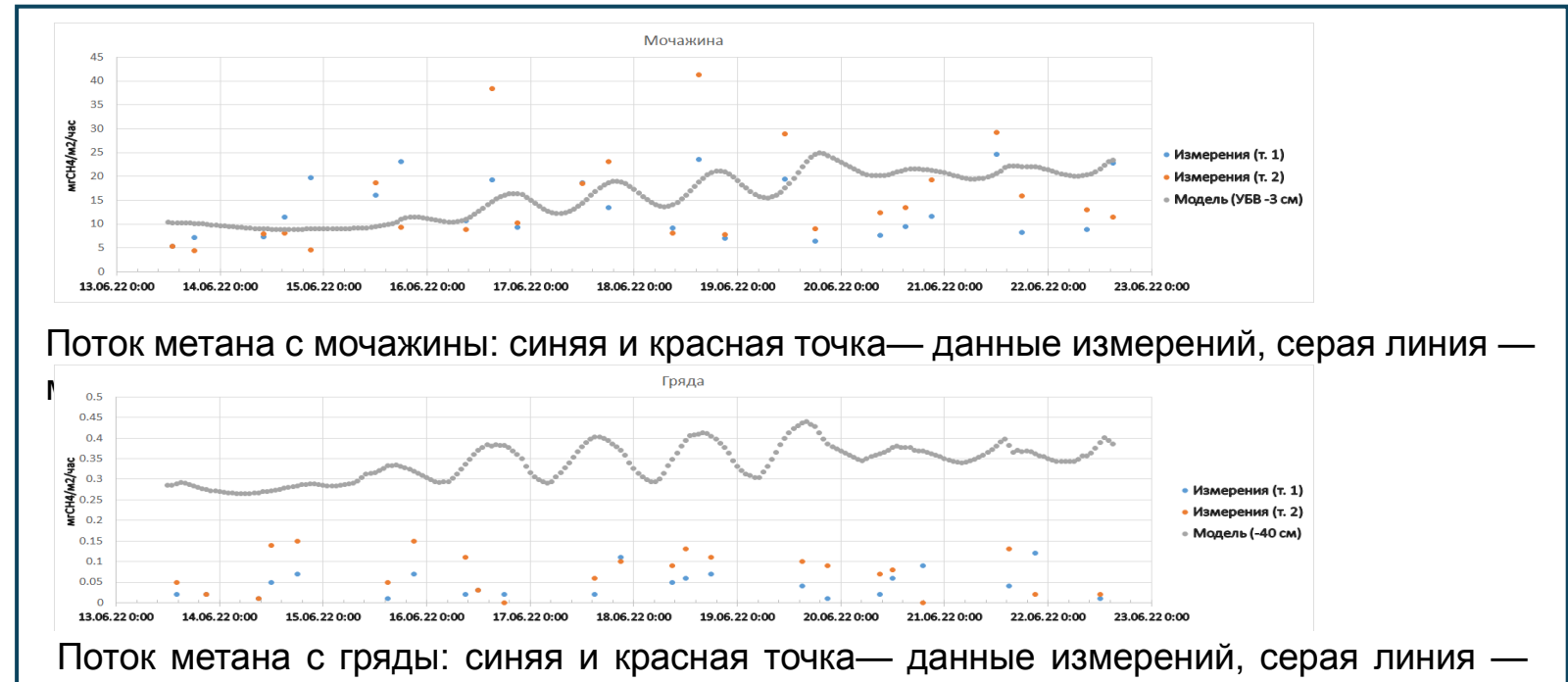
The Global Peatland Map 2.0. // United Nations Environment Programme Dai Y. et al. Evaluation of soil thermal conductivity schemes for use in land surface mod



Сравнение данных моделирования и мониторинга - Мухрино



Профиль температуры по данным измерений и данным моделирования для мочажины и гряды

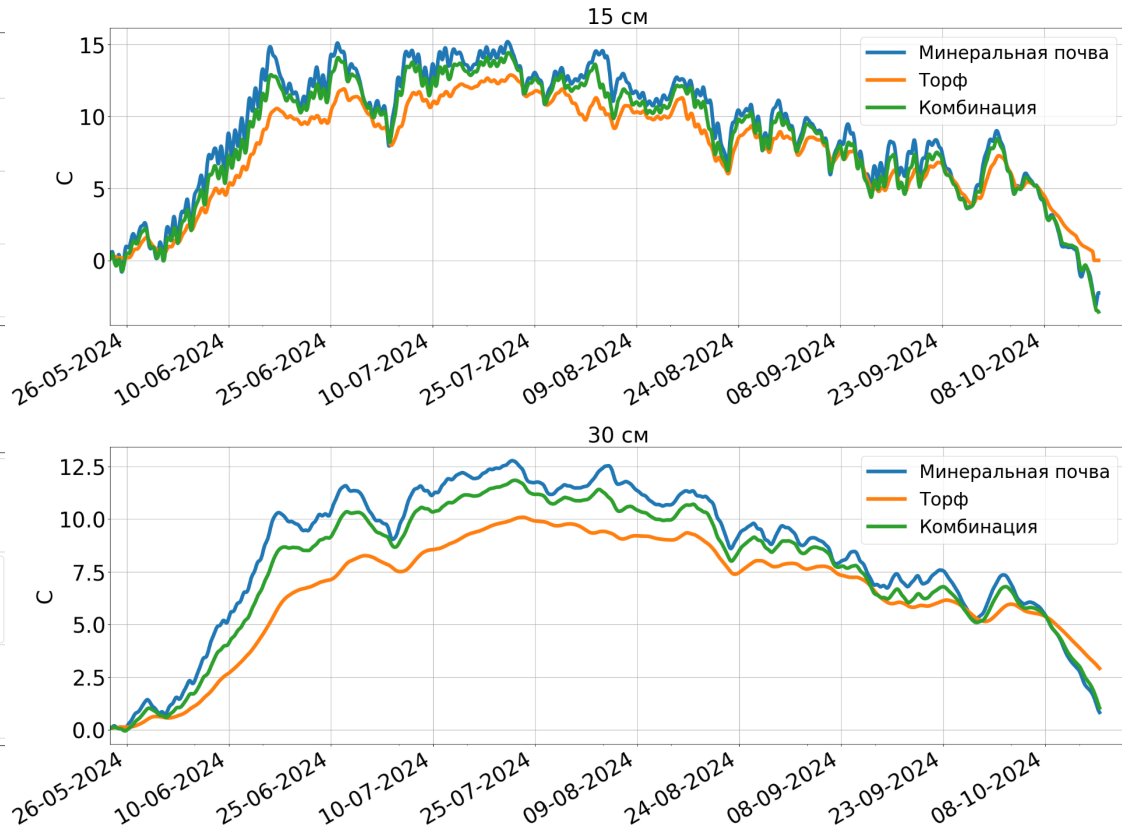
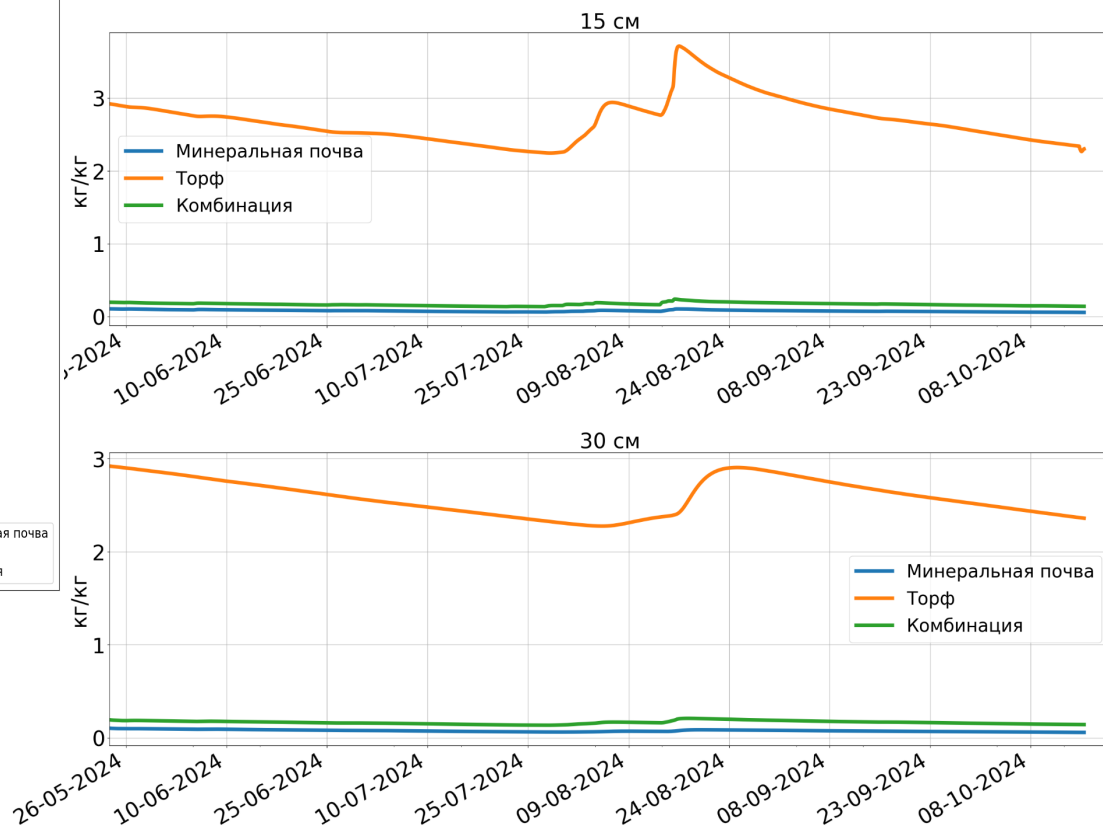
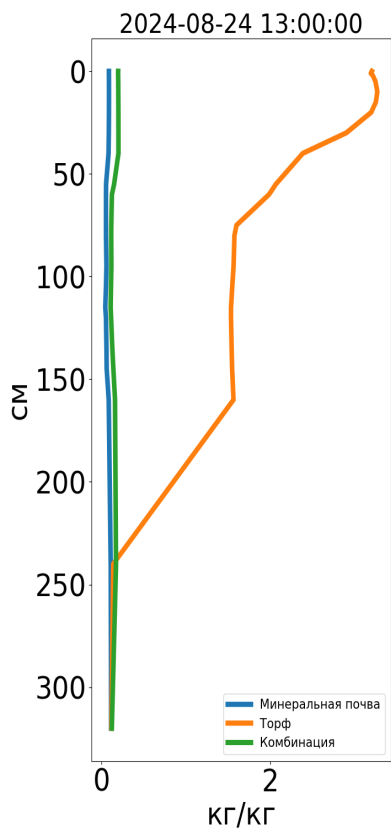


Средний для месяца поток метана: оранжевая — моделируемый поток с мочажины, зеленая — моделируемый поток с гряды, красная — данные измерений, синяя — комбинация моделируемых потоков из соотношения 70% мочажина и 30% гряда.

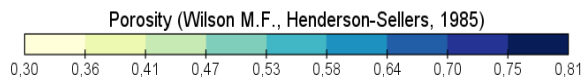
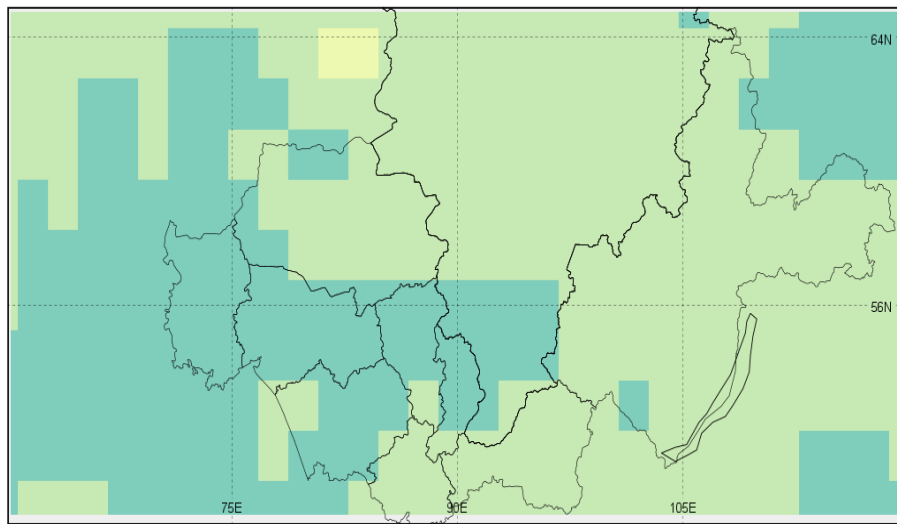
Проблема осреднения параметров почвы в ячейке сетки

модели

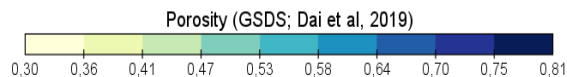
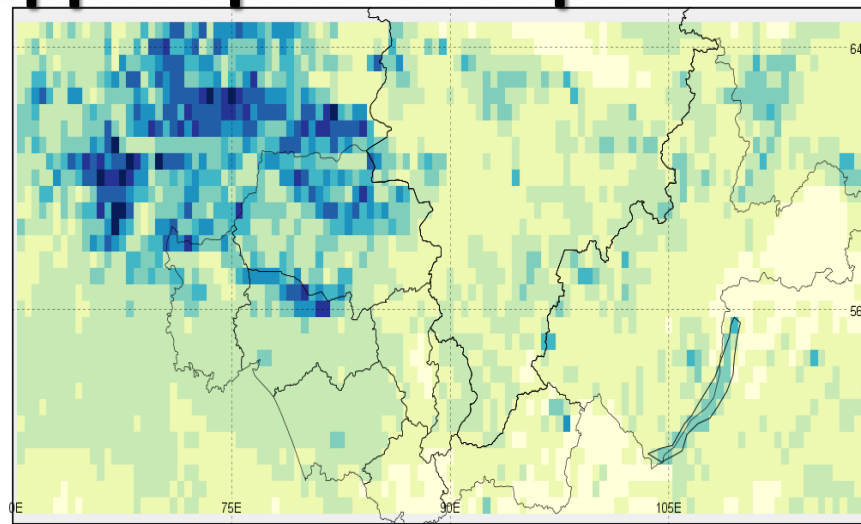
	sand	clay	silt	org	por	n	alpha	gam	ksi	rhodry	wsma x
мин	0.086	0.31	0.16	0.03	0.41	1.7	0.005	0.00009	43.7	1.6	0.26
торф	0.0005	0.001	0.0005	0.098	0.9	1.4	0.009	0.00096	20.7	0.12	7.3
комб=0.3то рф+0.7мин	0.06	0.22	0.11	0.05	0.56	1.6	0.006	0.00036	36.8	1.15	0.49



Распределение пористости, жидкой воды на глубине 30 см для территории Сибири

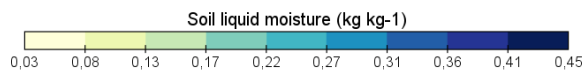
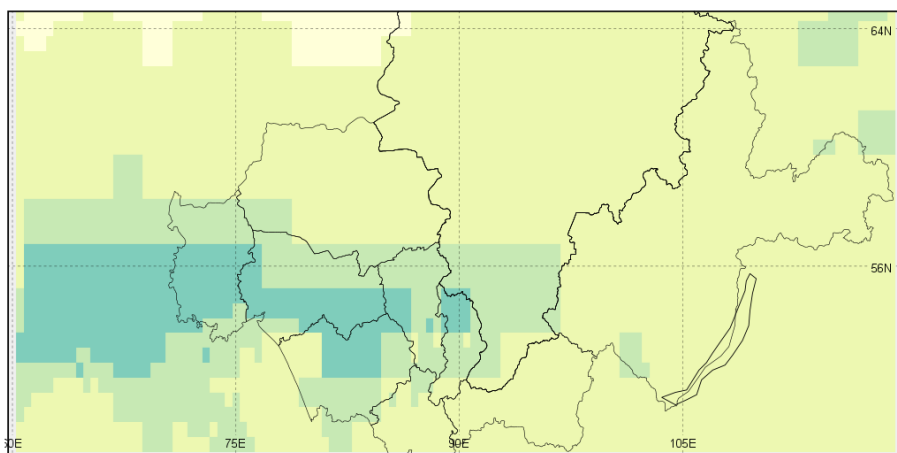


Soil liquid moisture



Soil liquid moisture

Разрешение:
0.25x0.25



Влажность почвы

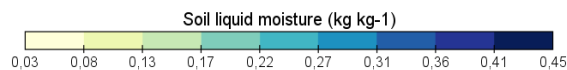
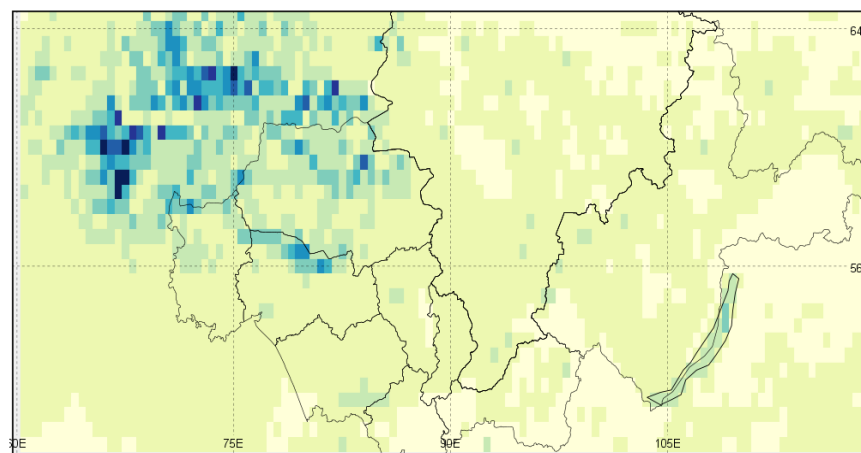
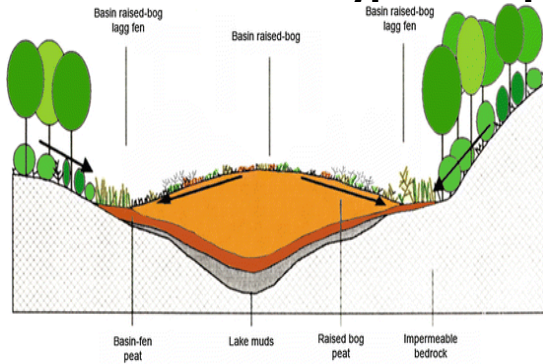


Схема определения уровня болотных вод согласуется со схемой определения

уровня грунтовых вод.



Для **олиготрофных болотных** ландшафтов необходимо учитывать форму поверхности и связанный с ней горизонтальный поток воды от центра болота к его периферии.

Вводится новое слагаемое, зависящее от горизонтального размера водно-болотной экосистемы и высоты центральной части относительно периферии;

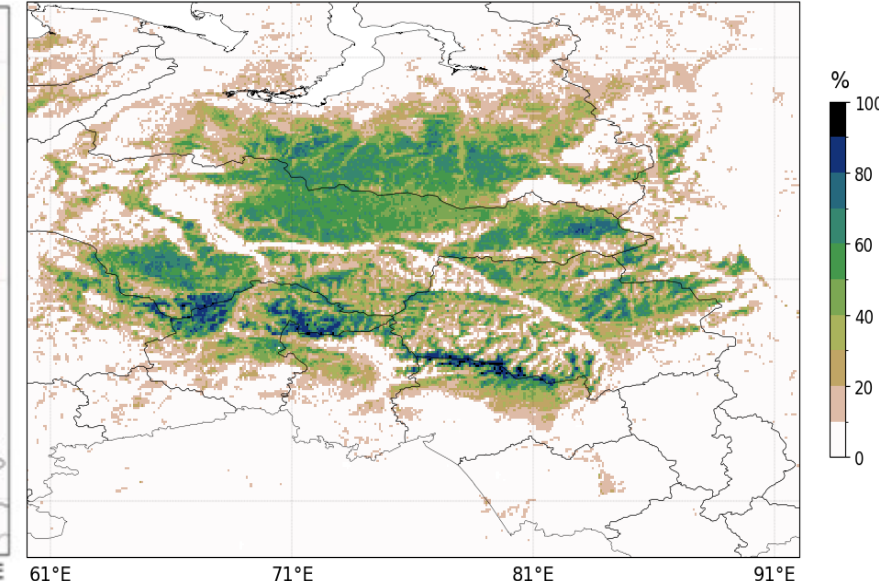
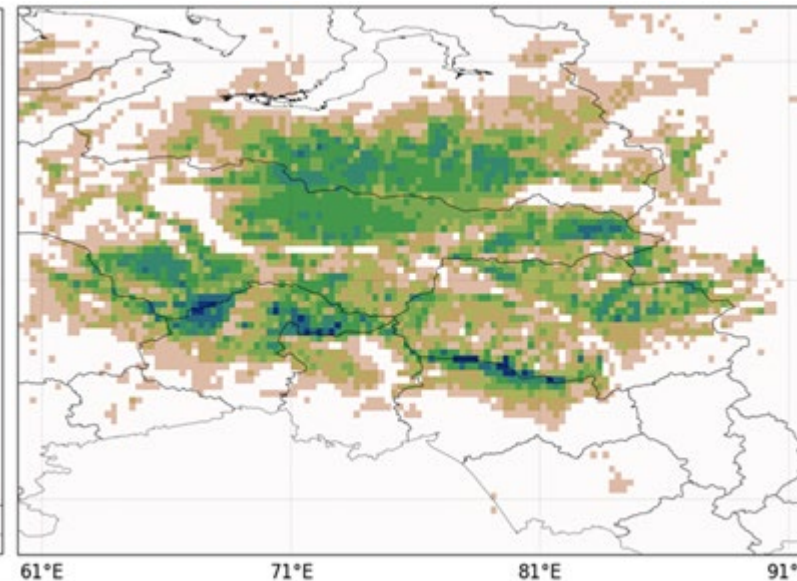
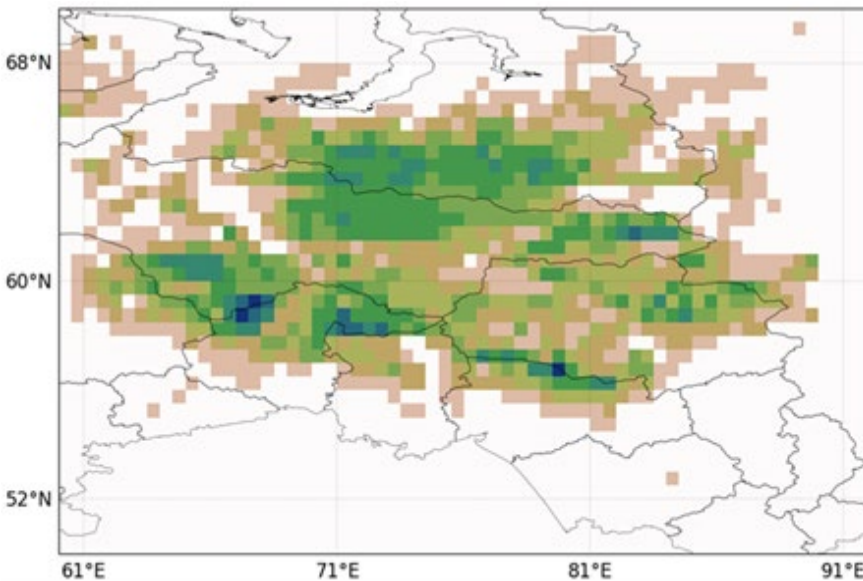
$$\frac{\partial z_{GWL}}{\partial t} = \left(-\lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} + \gamma \right) \Big|_{z=z_{GWL}} - k_0 \gamma_{max} \left[0, \left(\frac{z_{GWL} - z_p}{R} \right) \right]$$

k_0 безразмерный калибровочный коэффициент учитывает эффекты отклонения реальной формы поверхности болота от окружности, R - радиус окружности, аппроксимирующей форму горизонтальной проекции болота.

0.5 -0.5

0.25 -0.25

0.08 -0.08

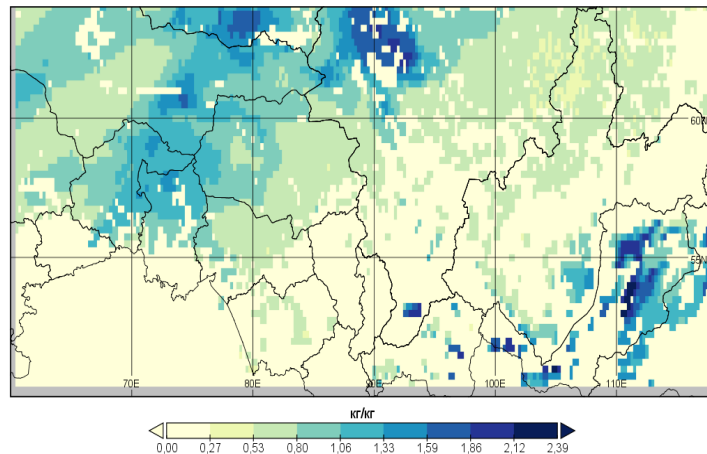


Архив пространственных данных, описывающих компоненты теплового баланса поверхности и потоков метана с болот для территории южно-таежной зоны Западной Сибири

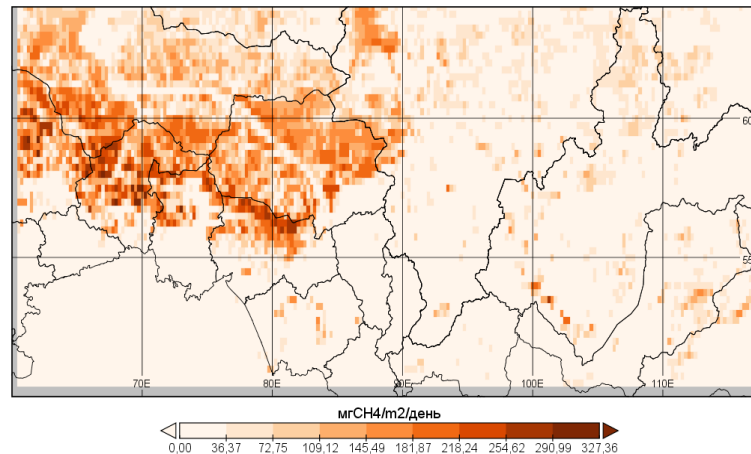
Численный эксперимент проводился для территории, включающей южно-таежную часть Западно-Сибирской равнины сроком 30 лет с 1990 г. по 2020 г.

Результаты расчета представляют собой двумерные и трехмерные поля в формате netCDF с пространственным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$ и шагом по времени 1 час. Выводятся следующие характеристики:

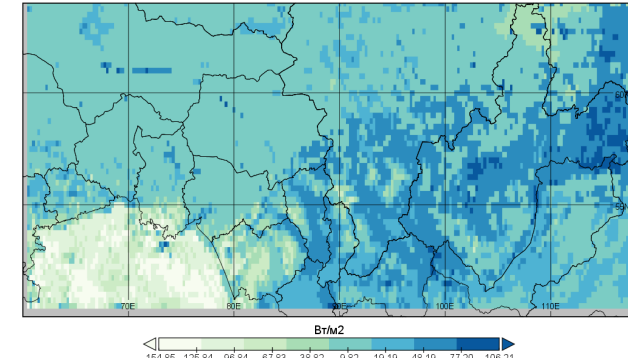
- Поток явного тепла HE , Вт/м²
- Поток скрытого тепла LE , Вт/м²
- Температура и влажность почвы на 23 уровнях по глубине до 10 м
- Интегральный поток метана с ячейки (мгCH₄/м²/час)



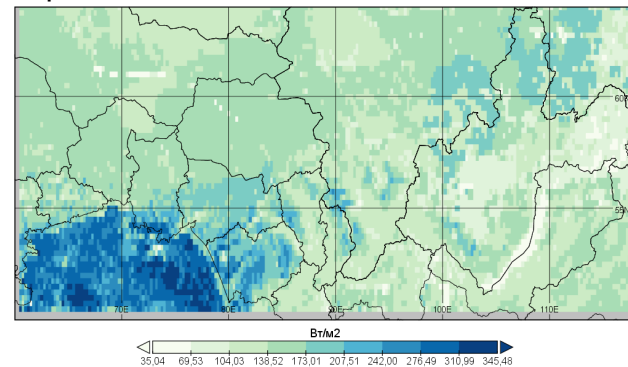
влажность почвы на верхнем слое, W_{soil} , кг/кг, июль



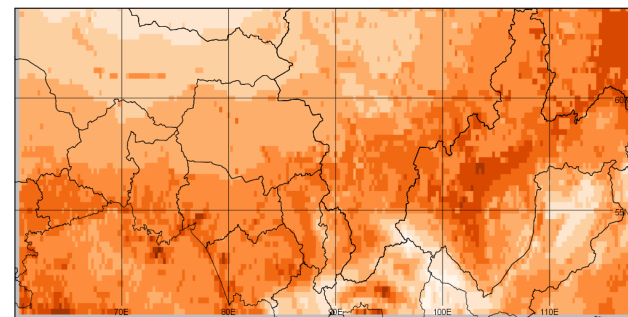
средний за месяц поток метана, июль, мгCH₄/м²/час



средний поток явного тепла HE , Вт/м², июль



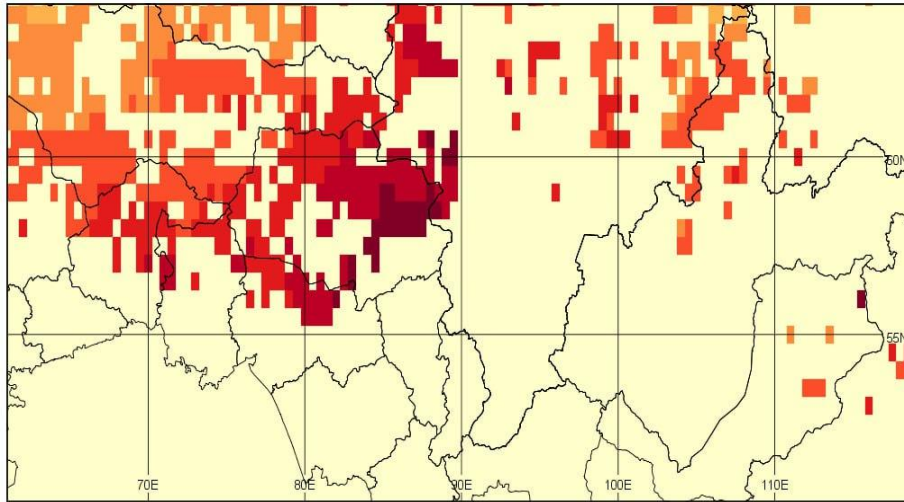
средний поток скрытого тепла LE , Вт/м², июль



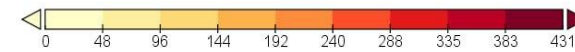
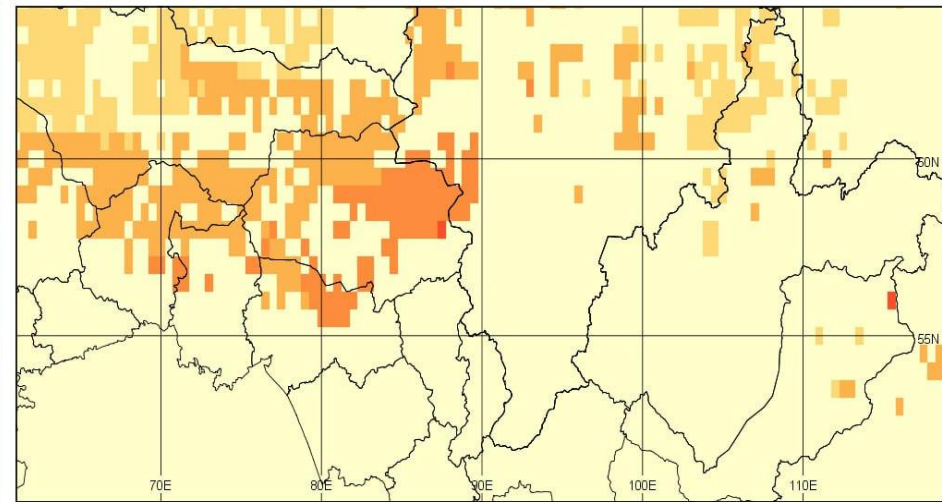
Средняя температура T_{soil} , °C

Среднемесячные значения за август

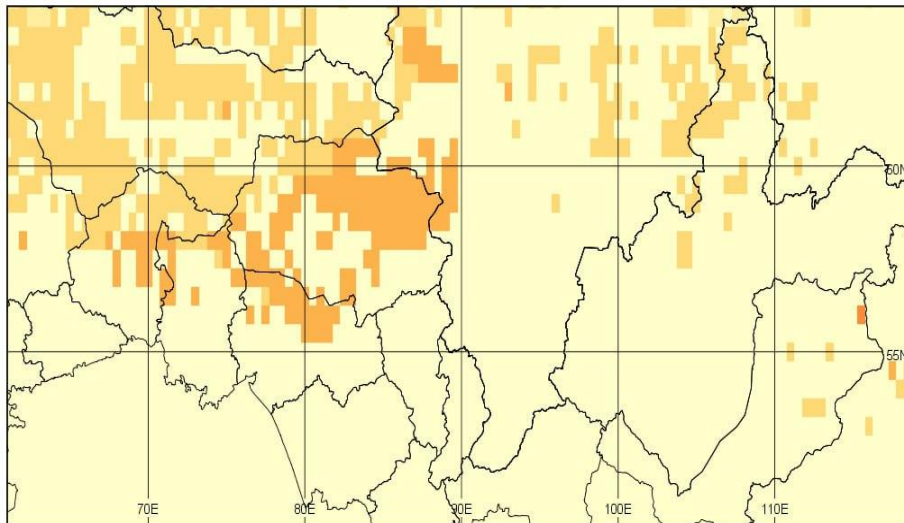
Топь



Мочажина

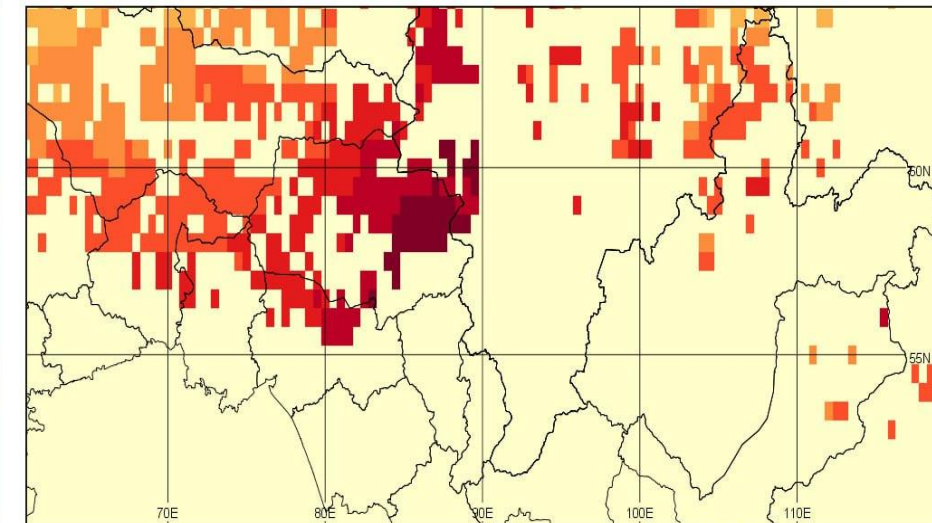


Гряда

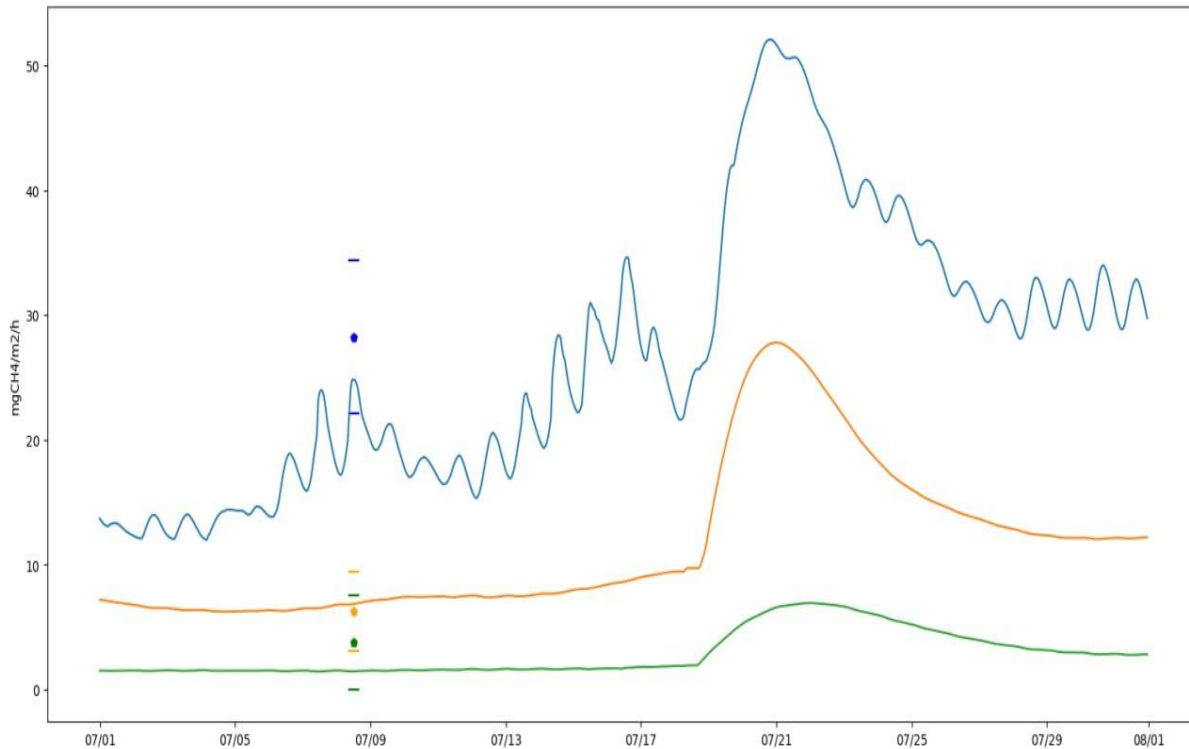


mgCH₄/m²/day

Топь — Гряда



Верификация по данным наблюдений для 9 июля 2013 г., точка с координатами 56.0 N, 77.5 E



Поток CH₄: **зеленый цвет — гряда, оранжевый — рям, синий — топь**

Поток метана, воспроизведенный моделью в ячейке, географически совпадающей с точкой, в которой были сделаны эти измерения, хорошо согласуется с данными измерений и находится в пределах интервалов, указанных авторами.

В каждой ячейке три потока метана для различных типов микроландшафтов:

- 1 Уровень воды во всех ячейках с болотом в модели метана близок к 0 см (**Топь**)
- 2 Уровень воды во всех ячейках с болотом в модели метана близок к 10 см (**Рям**)
- 3 Уровень воды во всех ячейках с болотом в модели метана близок к 30 см (**Гряда**)

На данном этапе мы не можем решить проблему динамики микроландшафтов в привязке к среднему УБВ.

Можем оценить интервал возможного потока и некоего среднего в нем, если примем некоторые гипотезы:

1. Все болота в моделируемой области являются топями, (поток с территории становится максимальный).

2. Все болота являются рядами (поток с территории становится минимальный).

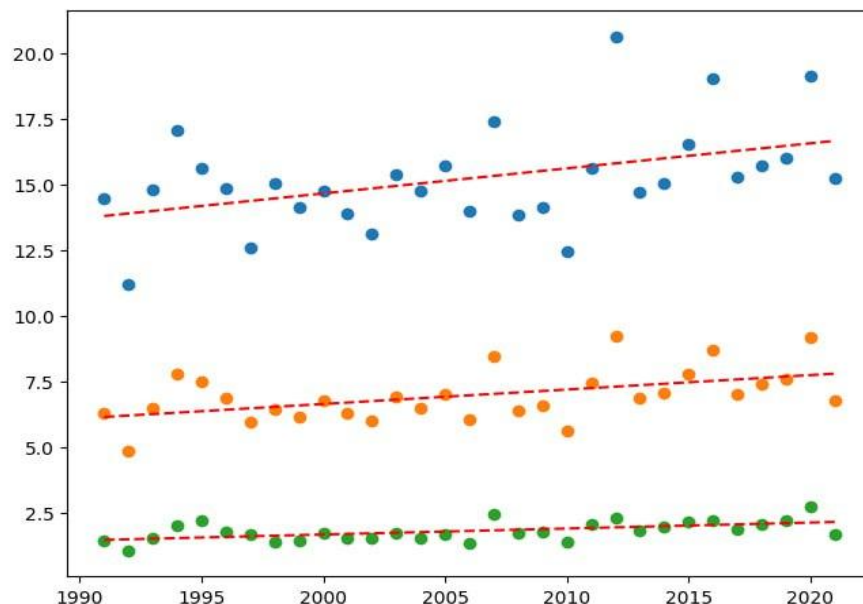
3. Под средним мы будем понимать комбинацию выделенных типов в следующем соотношении:

$0,2 \cdot \text{топь} + 0,5 \cdot \text{мочажина} + 0,3 \cdot \text{гряда}$. (по некоторым оценкам данные пропорции характерны для болотных комплексов Западной Сибири, при том, что они фактически статичны во времени)

	Мая	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Среднее	1.1	8.1	12.5	11.9	5.6
min-max	0 — 3.8	2.1 — 18.2	3.6-27.6	3.7-24.8	2.5-9.3

Средние за месяц значения потока метана ($\text{мгCH}_4/\text{м}^2/\text{час}$).

Интегральный с территории годовой поток метана с 1990 по 2020 гг., в мегатоннах



$$\text{Комб} = 0,2 \cdot \text{топь} + 0,5 \cdot \text{мочажина} + 0,3 \cdot \text{грязь}$$

Интегральные значения потока метана за 30 лет:

макс. **472.411** Мт.; комб. **216.030** Мт; мин. **55.747** Мт.

Средние за 30 лет составляет:

макс. **15.75** Мт/год; комб. **7.2** Мт/год; мин. **1.86** Мт/год.

Для максимально возможного потока рост более значимый чем для минимально возможного. Для средней оценки же он оставляет 1.3 мегатонны **за 30 лет или 20 % от значения 1990 год**. В случае **увеличения площадей топей интегральный поток будет возрастать**, в случае же падения среднего годового УБВ или увеличения площадей не обводненных участков болот интегральный поток с болот будет уменьшаться.

Углеродный цикл болот. Растительность

Растительный мир в болотных экосистемах значительно отличаются из-за высокого влияния **Уровня грунтовых вод**

Два подхода к моделированию болот

1. ORCHIDEE-PEAT (Qiu C. et al.), CTEM (Wu Y. et Al.)

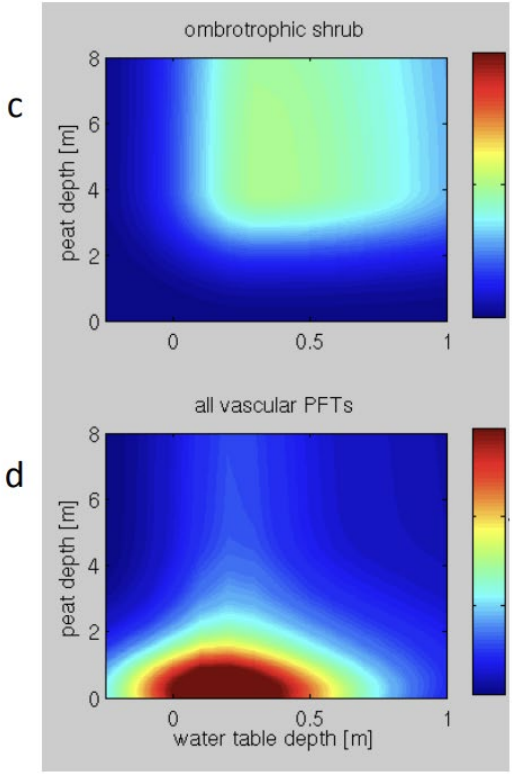
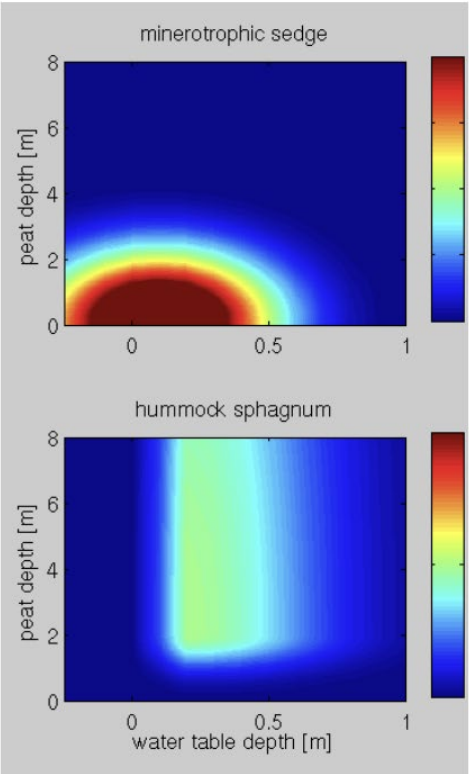
Параметры функциональных типов растений,
Как это сделано в примере CTEM (Wu Y. et Al.)

Параметр	Мхи	Вечнозелёные кустарники	Листопадные кустарники	Осоки
$V_{max\mu} \text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	106.5 (лето), 6.5 (остальное)	60	50	40
$T_{low}^{\circ}\text{C}$	0.5	-2.0	-2.0	-1.0
Макс. глубина корней (м)	–	1.00	1.00	1.00
Мин. соотношение корни/побег	–	0.16	0.16	0.30
Базовое дыхание корней (15°C)	–	0.5000	0.2850	0.1000

2. Holocen Peatland Model (Frolking S. et al.)

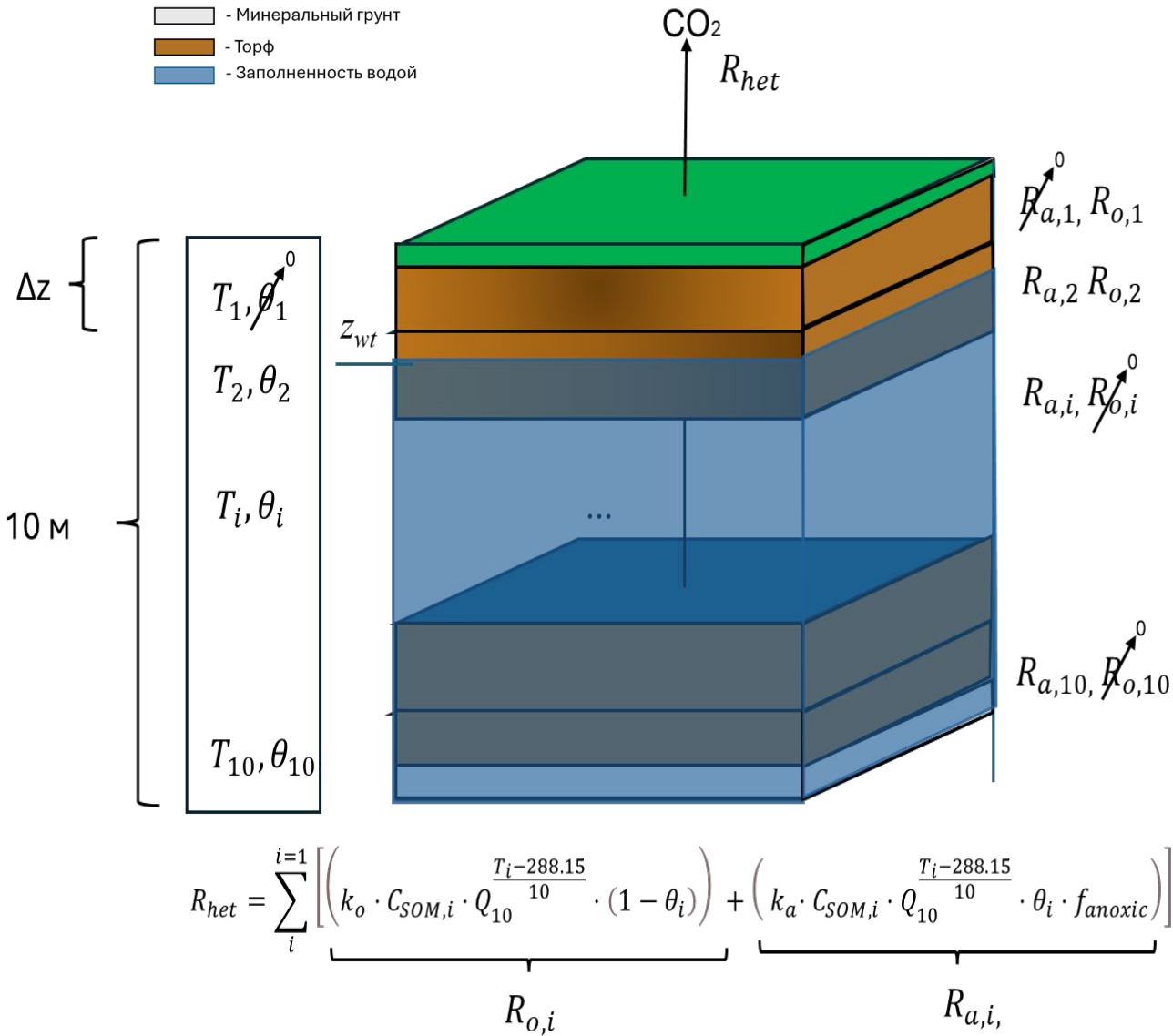
Параметризация угнетенности учет **УГВ** и **глубины торф** через **корректировку NPP**

$$NPP_i = NPP_{i,max} \cdot \exp \left(- \left[\left(\frac{z_{WT} - z_{opt,i}^{WT}}{\sigma_{i,WT}^{\pm}} \right)^2 + \left(\frac{h_{PD} - h_{opt,i}^{PD}}{\sigma_{i,PD}^{\pm}} \right)^2 \right] \right)$$



Wu Y., Verseghy D. L., Melton J. R. Integrating peatlands into the coupled Canadian land surface scheme (CLASS) v3. 6 and the Canadian terrestrial ecosystem model (CTEM) v2. 0 //Geoscientific Model Development. – 2016. – Т. 9. – №. 8. – С. 2639-2663.
Frolking S. et al. A new model of Holocene peatland net primary production, decomposition, water balance, and peat accumulation //Earth System Dynamics. – 2010. – Т. 1. – №. 1. – С. 1-21.
Qiu C. et al. Modelling northern peatland area and carbon dynamics since the Holocene with the ORCHIDEE-PEAT land surface model (SVN r5488) //Geoscientific Model Development. – 2019. – Т. 12. – №. 7. – С. 2961-2982.

Схема гетеротрофного дыхания

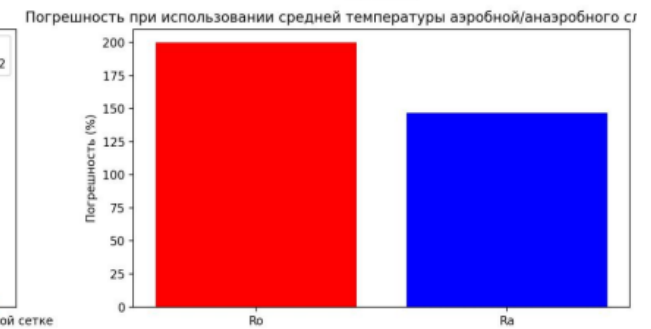
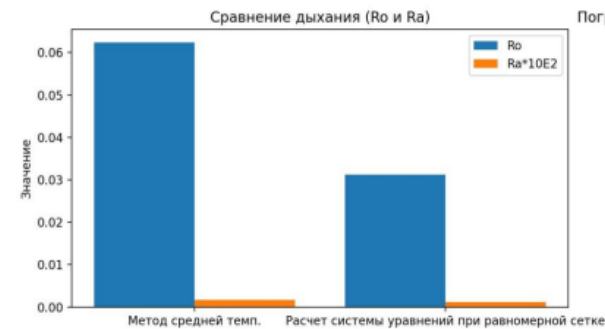
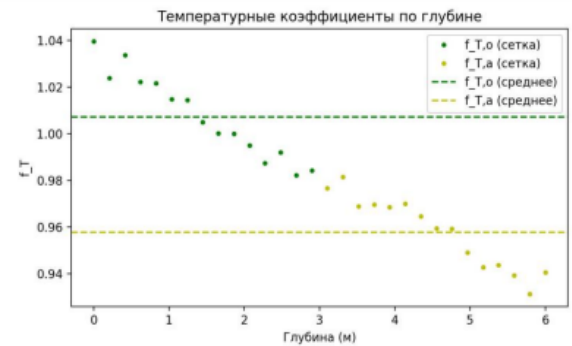
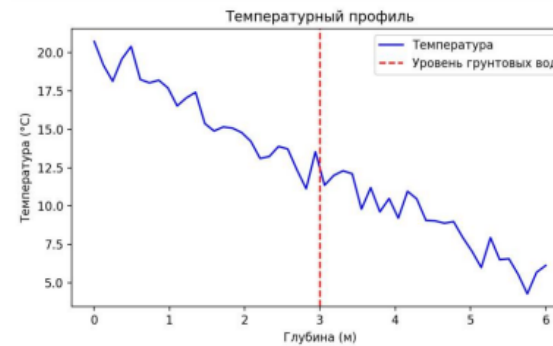


Интегральный подход упускает градиенты температур в деятельно слое

$$\epsilon_{\text{градиент}}^{(\text{дискр.})} \sim O((\Delta z)^2) \quad \epsilon_{\text{градиент}}^{(\text{интегр.})} \sim O(h)$$

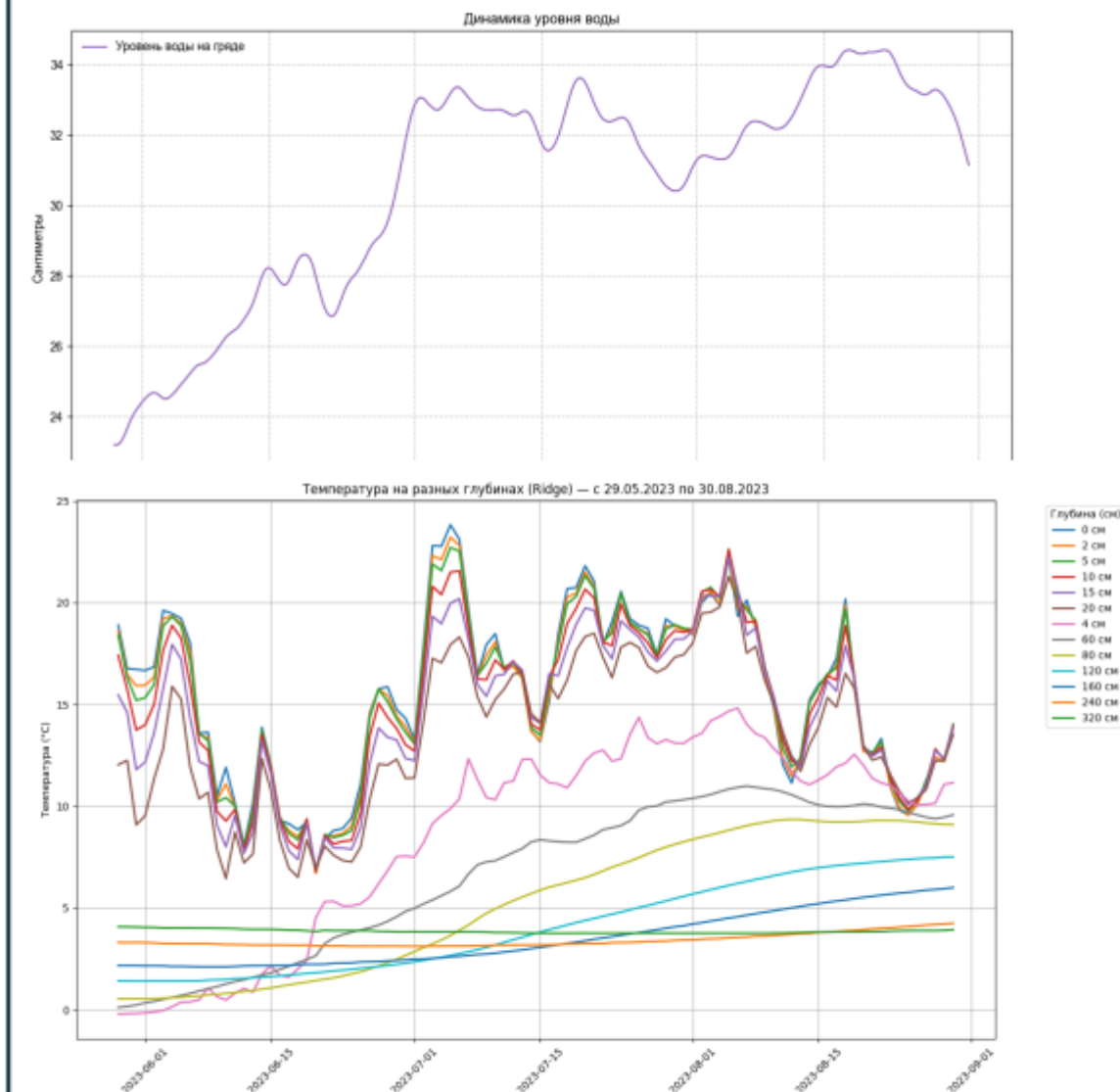
Из условия $h \gg \Delta z$ следует

$$\epsilon_{\text{дискр.}} \ll \epsilon_{\text{интегр.}}$$



Результаты, численные эксперимент, Мухрино

Входные данные для эксперимента



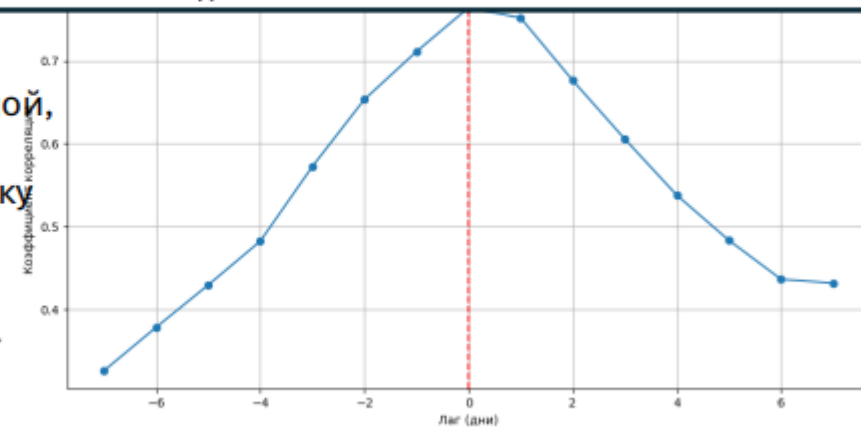
*Температура интерполируется на сетку модели

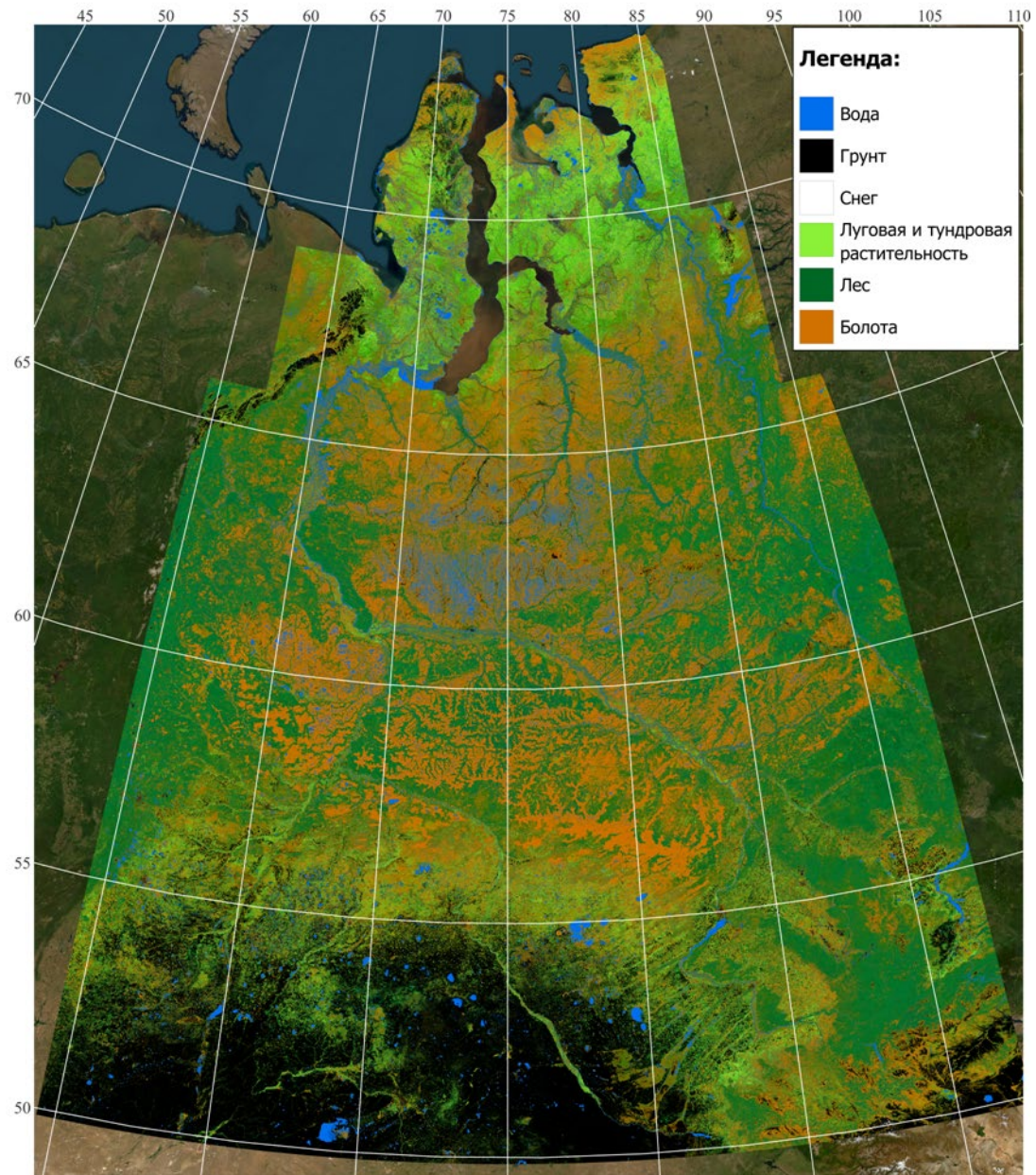
Результаты моделирования, сравнение с данными наблюдений Eddy Covariance



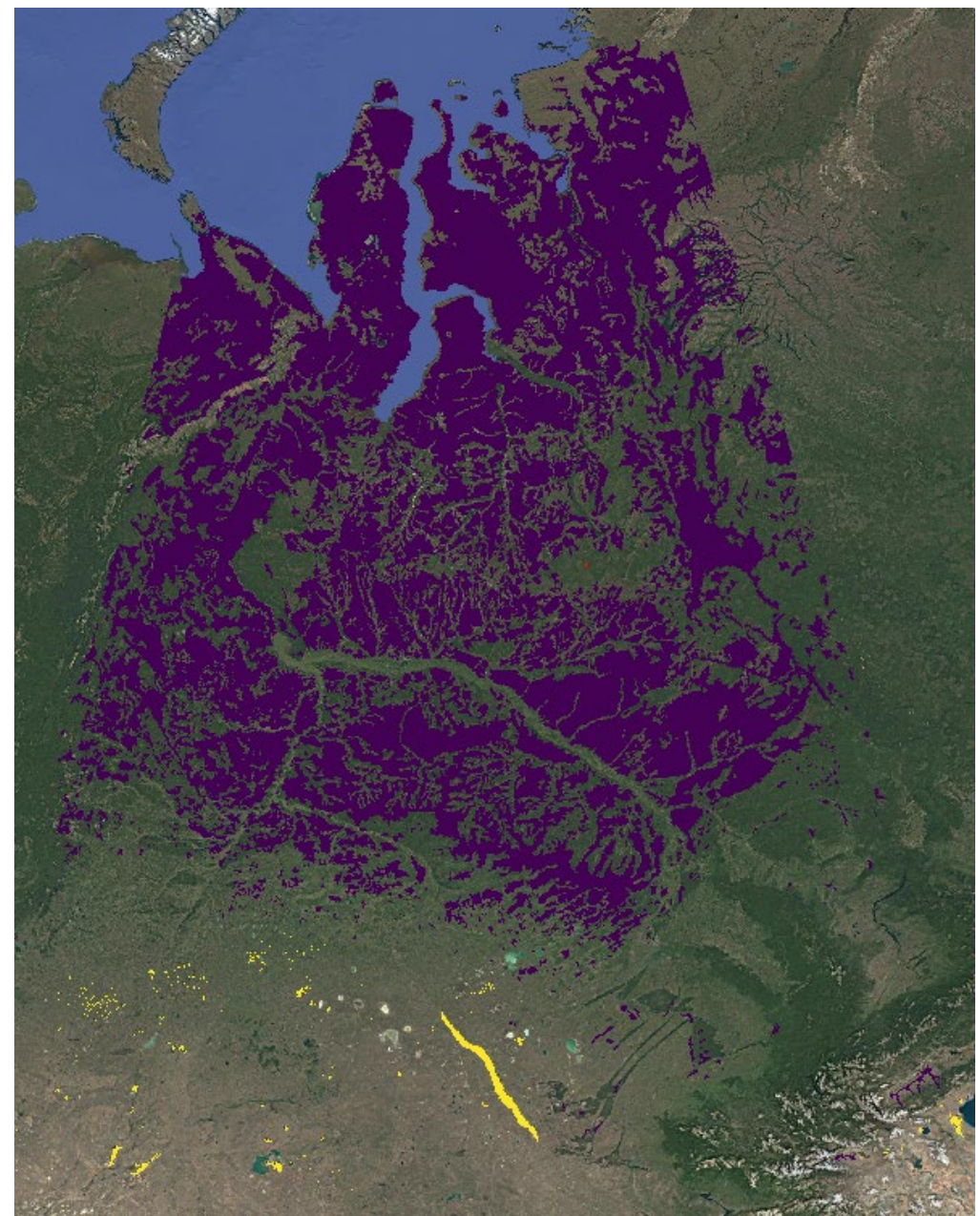
Гипотеза: Производство углекислого газа экосистемой, в некотором приближении равна диффузионному потоку газа на поверхности

$$F_{CO_2} \approx R_h = \sum_{n=1}^N [(1 - \theta_n) R_{o,n} + \theta_n R_{a,n}]$$





Полученные оценки– 25.87%



PeatGPA22WGS
35.98 %

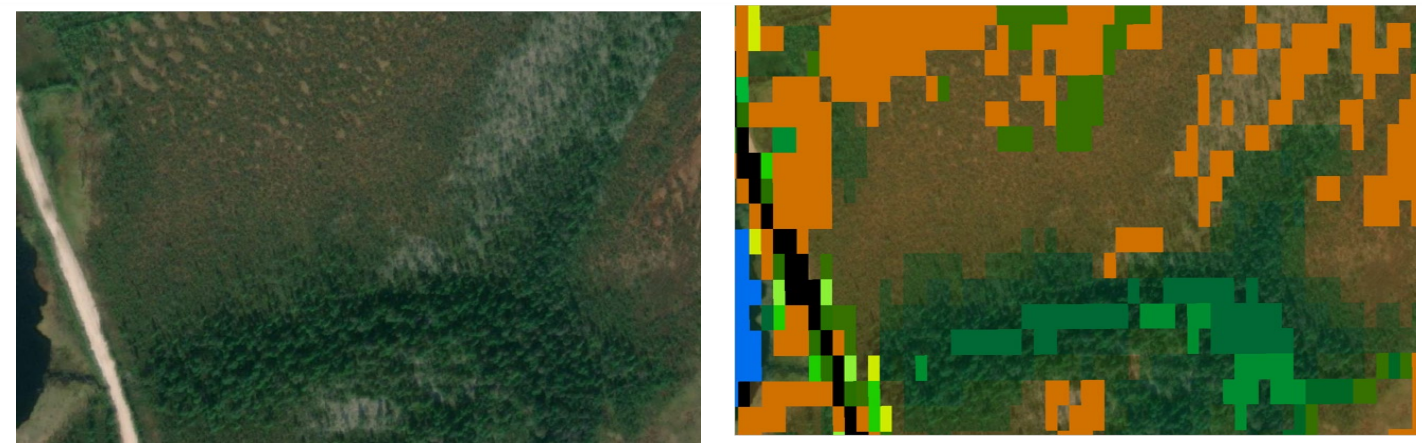
А – согласно работе (Шинкаренко и др., 2024)



Процентное соотношение классов



Б – авторское дешифрирование



Спасибо за внимание!