



Взаимодействие атмосферы с термически неоднородными ландшафтами по данным измерений и моделирования

И.А. Репина, Чечин Д.Г., Е.В. Мортиков

При участии: Варенцов М.И., Артамонов А.Ю., Ларина А.В., Пашкин А.Д.

**Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ**



РНФ

При поддержке РНФ, грант
№24-17-00155



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов) 11-15 ноября 2024

Мотивация:

➤ Взаимодействие между землей и атмосферой характеризуется потоками импульса, тепла, водяного пара и газообменом. Но однородные ландшафты редки. Распространены неоднородные поверхности, различные участки которых характеризуются различными альбедо, теплоемкостью, структурными характеристиками. Над неоднородными ландшафтами, а также поверхностями с крупными элементами шероховатости условия статистической стационарности и однородности нарушаются.

➤ В турбулентном обмене в неоднородном ландшафте большую роль играют движения, связанные с организованной турбулентностью: формируются когерентные структуры, которые генерируют дополнительный вклад энергии в спектры и коспектры потоков в приземном слое.

➤ В современных методах определения характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой используются теории, базирующиеся на гипотезе стационарности и однородности. Традиционно применяемые в атмосферном моделировании, энергобалансовых и биогеохимических расчетах параметризации основаны на выводах теории подобия Мони́на-Обухова, которая предполагает подстилающую поверхность, обладающую однородным горизонтальным распределением аэродинамической и температурной шероховатости и турбулентных потоков.

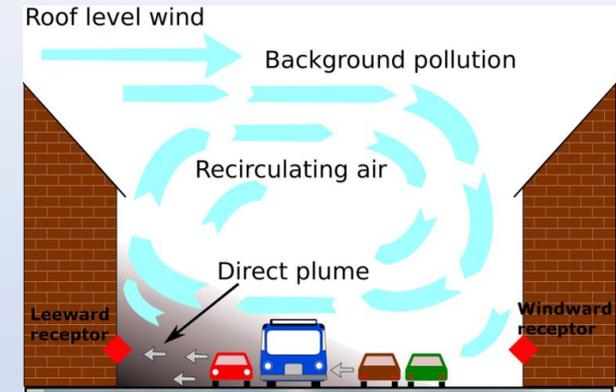
➤ Недостаточное знание структуры пограничного слоя атмосферы и его обмена количеством движения, теплом и влагой с неоднородной поверхностью является в настоящее время основным препятствием для правильного функционирования оперативных, глобальных и региональных моделей прогноза погоды и экспертных моделей для климата и его изменений.

Неоднородные ландшафты



Границы “лес-поле”,
побережья – одна
прямая или обратная
ступенька

Водоёмы,
окружённые лесами,
Лесные поляны –
замкнутые
открытые пространства



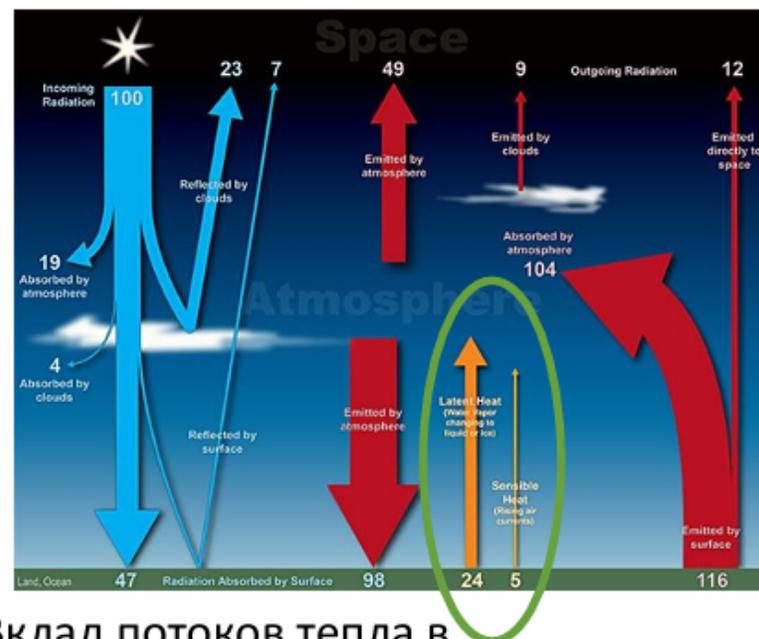
Городские улицы –
каньоны

- **Условия применимости ТПМО не выполнены:** различные участки характеризуются различными альбедо, теплоемкостью, структурными характеристиками. Нет статистической стационарности и однородности
- **Аналитические футпринт-модели для метода турбулентных пульсаций не разработаны**
- **Метод теплового баланса даёт только локальный поток тепла, не репрезентативный для ландшафта в целом**

Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности

Корректное описание взаимодействия атмосферы с поверхностью – основа точного прогноза погоды

- Поверхность – главный источник энергии и вещества для атмосферы
- Турбулентные потоки – основной механизм обмена между атмосферой и поверхностью
- Расчет потоков тепла в численных моделях атмосферы:
 - Турбулентные потоки относятся к подсеточным процессам, для их описания в моделях используются параметризации полученные на основе полуэмперических теорий
 - Теория подобия Монина-Обухова – используемая в атмосферном моделировании теория расчета турбулентных потоков, предполагает **однородность** подстилающей поверхности



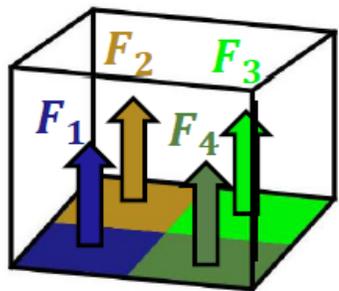
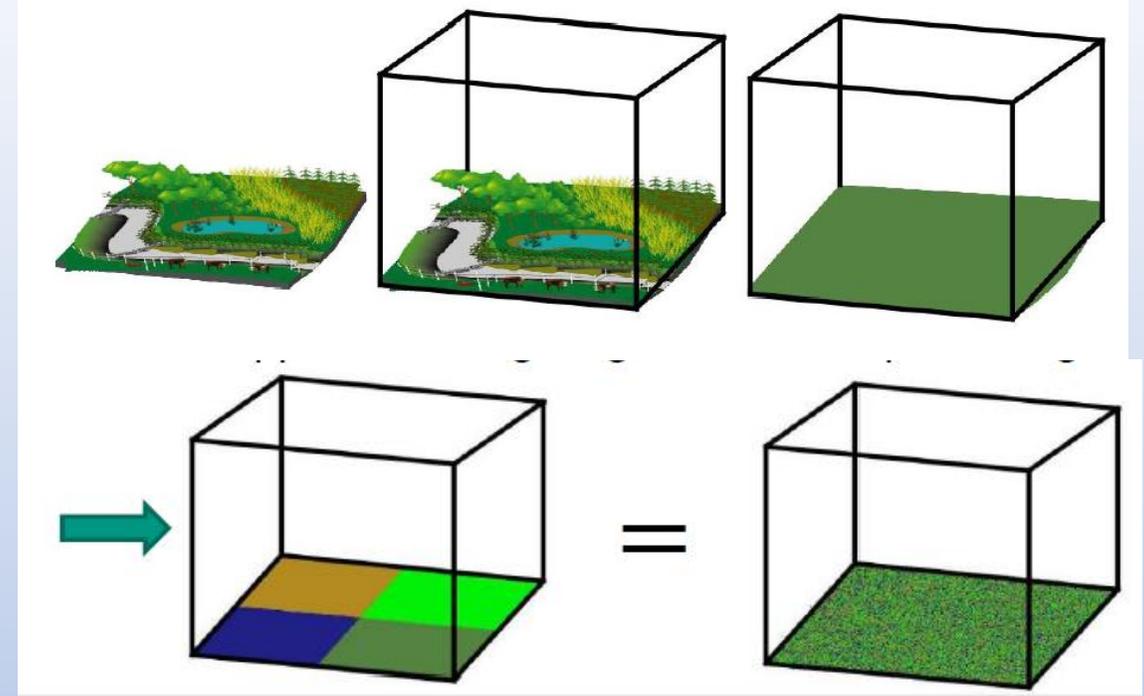
Вклад потоков тепла в энергетический баланс атмосферы

Одним из основных направлений совершенствования климатических моделей и методов прогноза погоды, является совершенствование физических параметризаций процессов подсеточных масштабов (В.Н. Лыков)

Неоднородная поверхность при моделировании

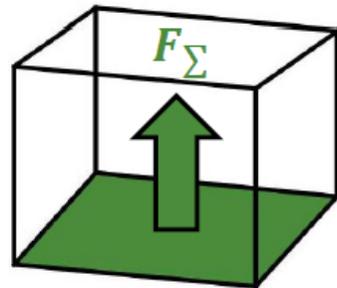
Метод решения проблемы – агрегирование потоков

Метод эффективных параметров (z_0 , C_d , свойства почвы и другие параметры осредняются внутри ячейки модели – см работы Pielke, Claussen и др., начало 1990-х)



$$F_{\Sigma} = \sum_i v_i F_i$$

weighting factors



Классический мозаичный метод (mosaic, tile approach) : коэффициенты обмена рассчитываются для каждого типа, потоки с разных типов суммируются с площадными весами; для всех типов атмосферный форсинг считается одинаковым (Arola, 1999)

Нижний уровень модели должен быть выше уровня смешения (Claussen, 1995), но недостаточно высоко, чтобы теория М-О выполнялась

Расчет потоков над неоднородным ландшафтом

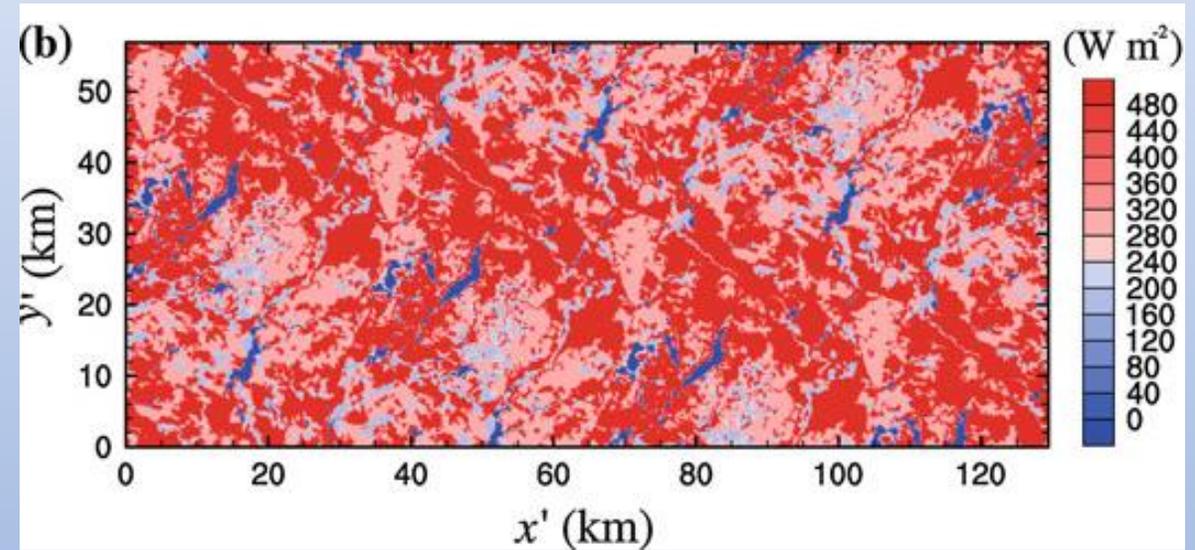
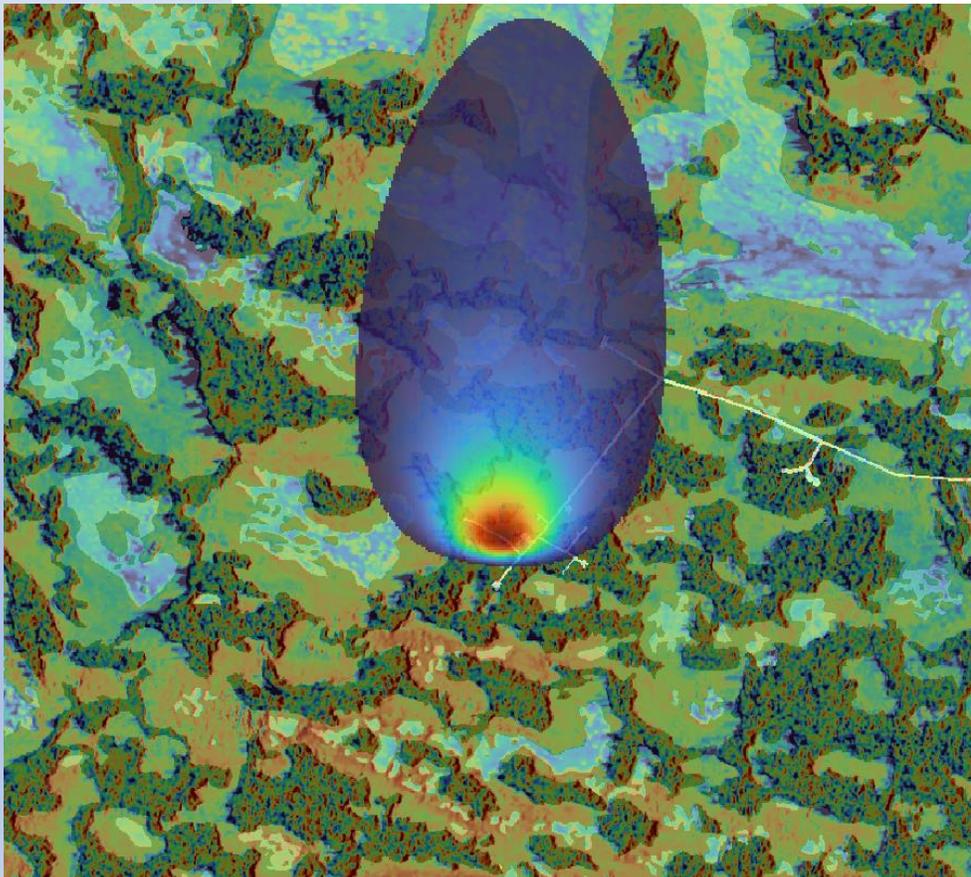
Разбивка поверхности на микроландшафты

Расчет динамического сопротивления и температуры поверхности отдельно для каждого типа поверхности

Расчет футпринта

Определение вклада микроландшафтов в формирование потока по футпринту

Расчет потока тепла по уточненным характеристикам подстилающей поверхности



Горизонтальное распределение потока,
Maronga , Raasch 2012

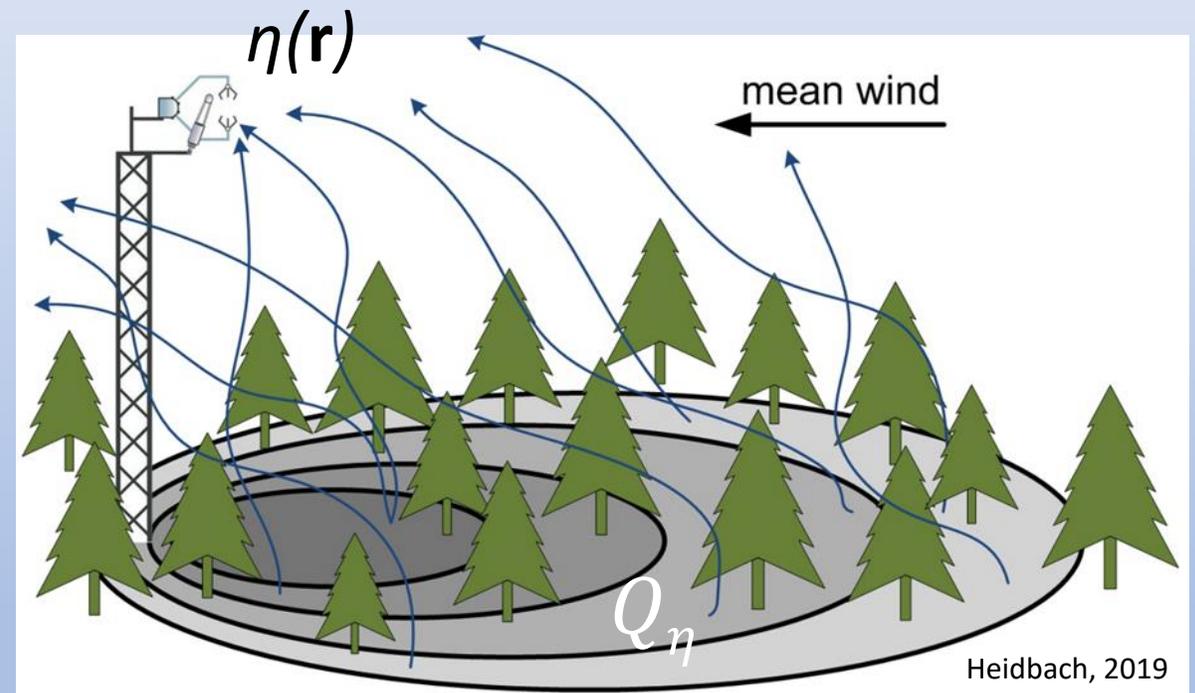
Концепция футпринта (*footprint*)

Футпринт описывает «поле зрения» (зону охвата) ЕС (*eddy covariance*)-системы и формально является передаточной функцией между измеренным значением потока η и источником Q_η на подстилающей поверхности в области R

$$\eta(\mathbf{r}) = \int_{\mathcal{R}} Q_\eta(\mathbf{r} + \mathbf{r}') f(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

Конфигурация и протяженность футпринта зависит от

- Высоты измерения
- Свойств поверхности
- Характеристик атмосферного потока (скорость ветра, направление ветра, турбулентность, ...)



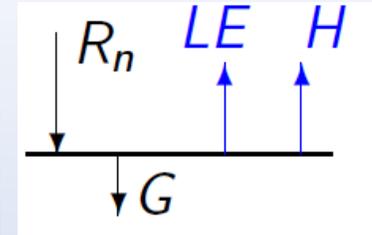
Переменные по времени

(Wilson and Swaters 1991; see also Pasquill and Smith 1983)

Проблема незамыкания теплового баланса

Баланс энергии на поверхности:

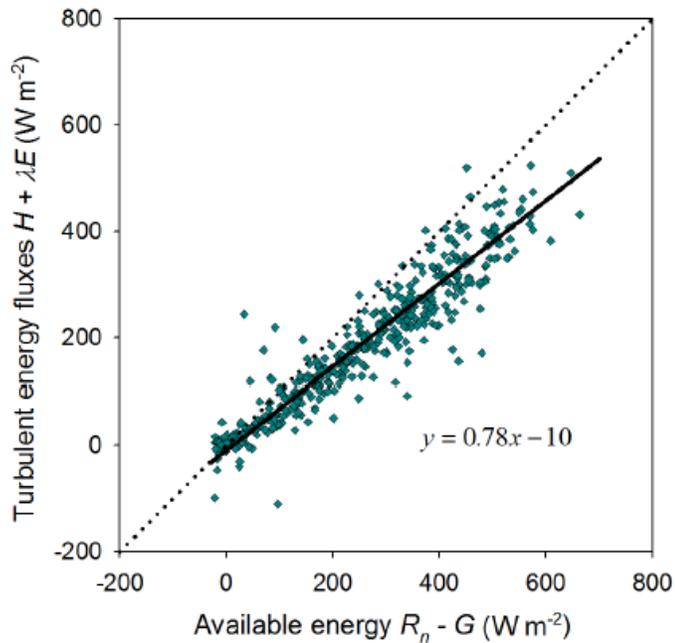
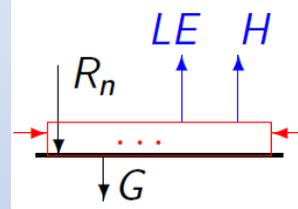
$$R_n - G = LE + H$$



Пульсационные измерения недооценивают турбулентные потоки

$$R_n - G \geq LE + H$$

$$R_n - G = LE_{(t)} + H_{(t)} + \Delta$$



Панин Г. Н., Бернхофер Х. , 2008

Leuning R., 2012

Foken T (2008)

Wilson K. et al. 2002.

Foken T, Mauder M, Liebenthal C et al (2010)

Mauder M., Foken T., Cuxart J. 2020.

Причины несходимости баланса Mauder M., Foken T., Cuxart J. 2020.

Ошибки измерений

Систематическая ошибка измерения потока тепла через почву

Систематическая ошибка измерений радиационного баланса

Систематическая ошибка акустического анемометра

Систематическая ошибка измерения влажности

Несоответствие футпринтов для разных приборов

Ошибки обработки данных

Систематическая ошибка алгоритмов коррекции данных

Неопределенность оператора осреднения

Дополнительные источники энергии

Сохранение тепла в пологе растений

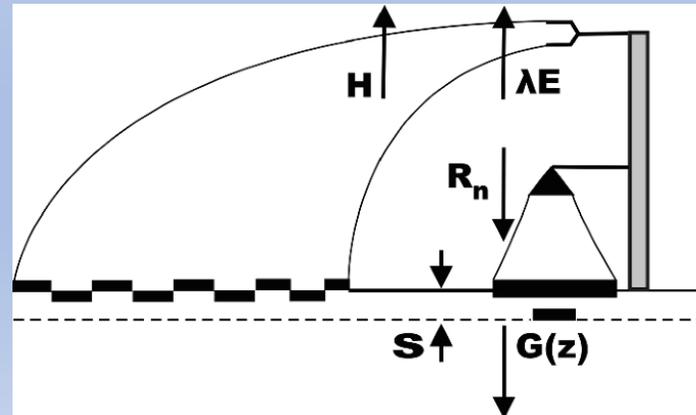
Процессы фотосинтеза

Потенциальная энергия воды

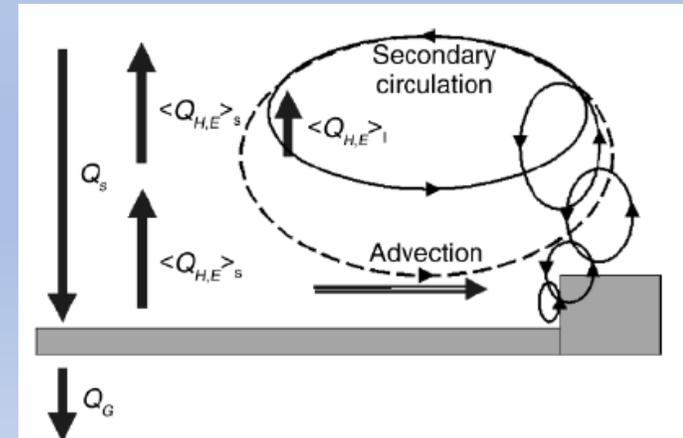
Мезомасштабные движения/ вторичные циркуляции

Дивергенция горизонтального потока

Вертикальная/горизонтальная адвекция



Foken 2008, Panin, 1998



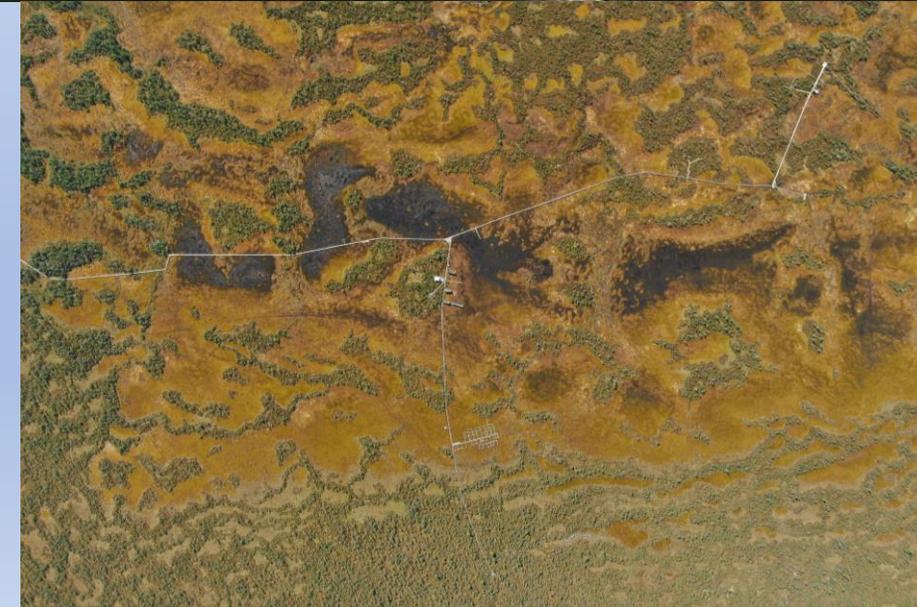
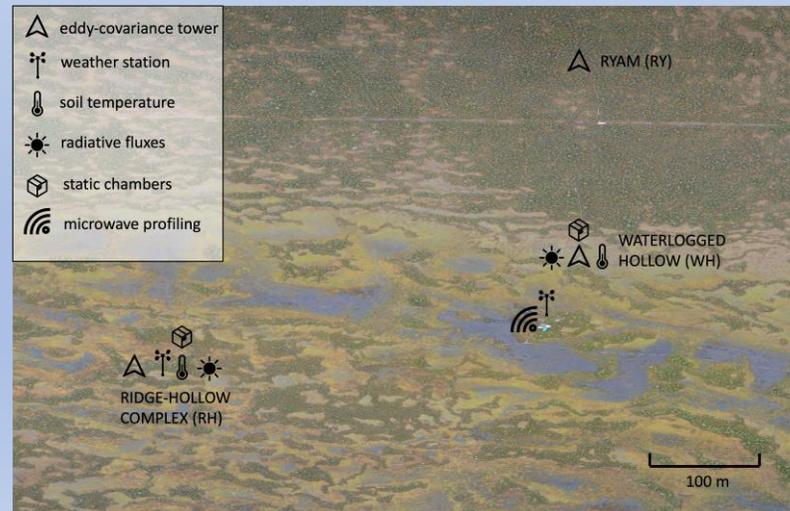
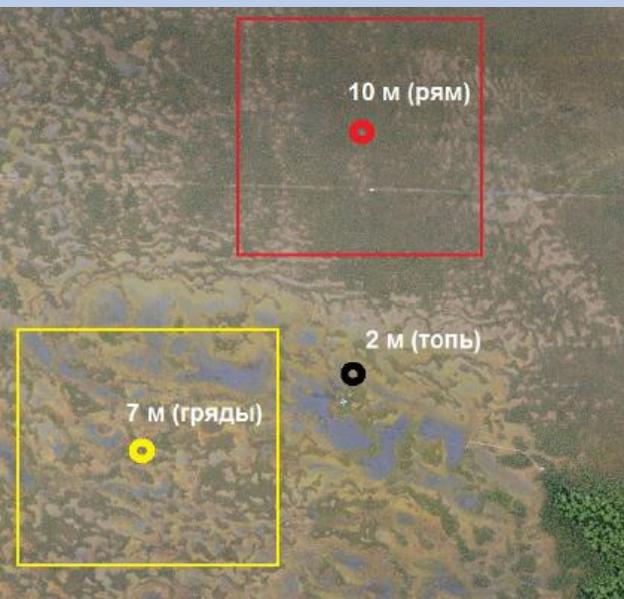
НЕОДНОРОДНОСТЬ БОЛОТНОГО ЛАНДШАФТА



Болотные комплексы (I – Рям, II – Грядо-мочажинный комплекс, III – Грядо-мочажинно озерный комплекс, IV – реки и озера, V – открытые болота, VI – мозаичные болота, VII – болота в лесу, VIII – полигональные) и экосистемы в болотах (1 открытая вода, 2 – заболоченные участки (мочажины), 3 – олиготрофные болота, 4 – гряды, 5 – рямы).

Полевой болотный стационар Мухрино:

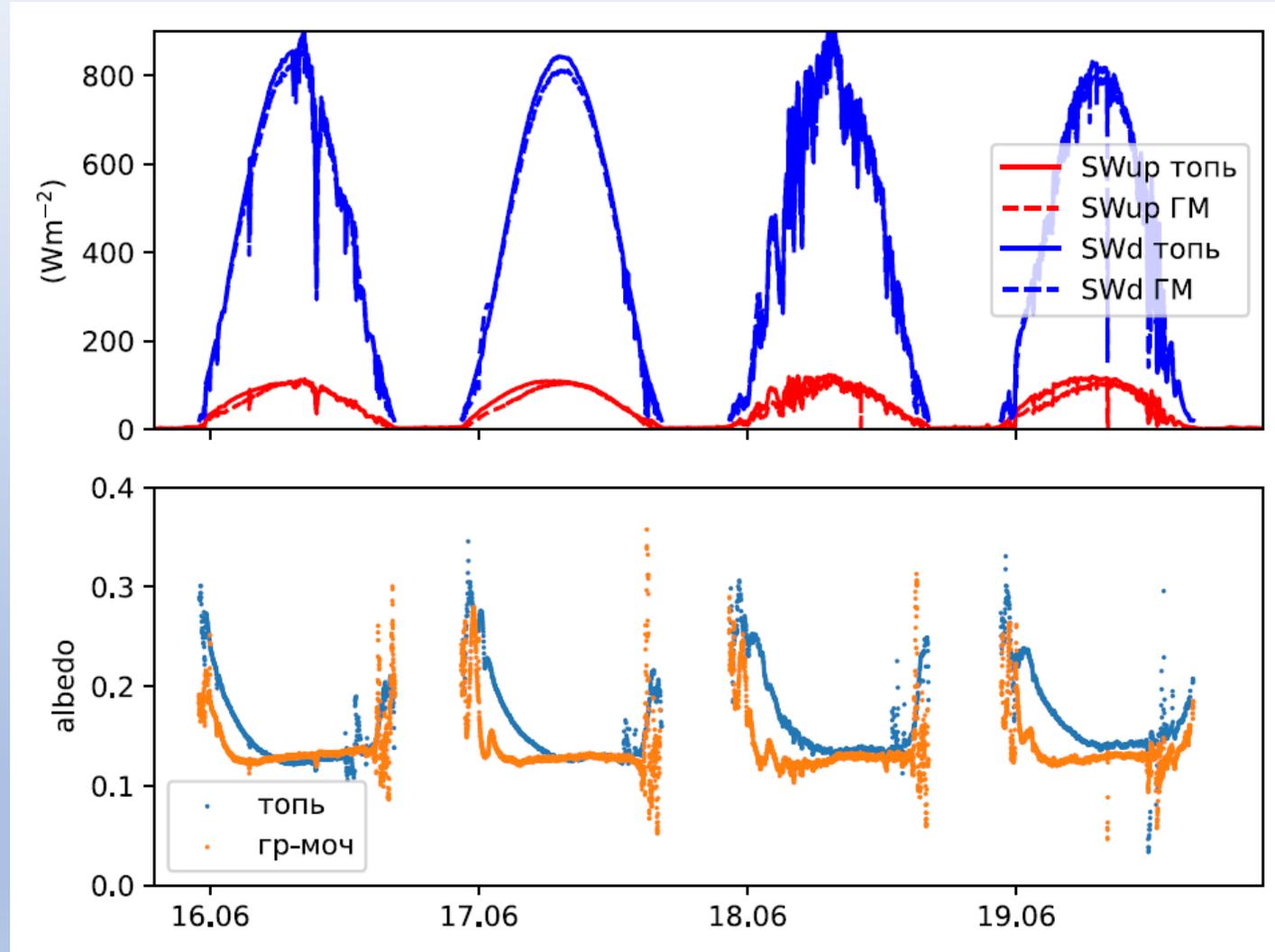
- Количественная оценка пространственной изменчивости параметров микроландшафтов, таких как: превышение над уровнем грунтовых вод, температура поверхности, альbedo, параметр шероховатости и др.
- Количественная оценка пространственной изменчивости составляющих теплового баланса и эмиссий метана
- Развитие и верификация параметризаций турбулентного обмена над неоднородной подстилающей поверхностью
- Разработка и верификация модели деятельного слоя с учетом пространственных неоднородностей внутри болотного ландшафта



РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС: АЛЬБЕДО

Альbedo топи выше, чем альbedo гряд при низких углах солнца

- разница в потоках отраженной радиации порядка 20 Втм^{-2}

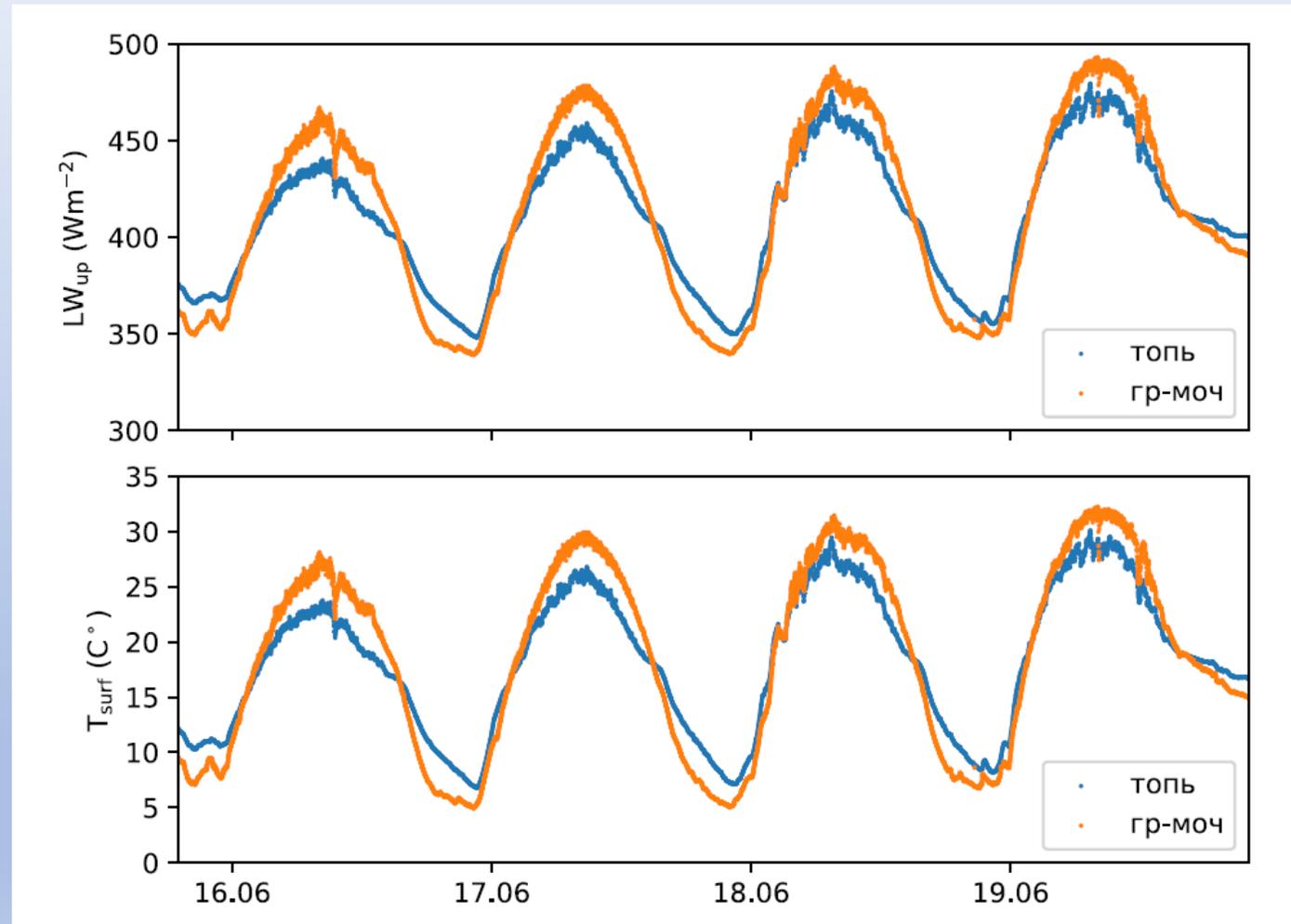


РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС: ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ

Большая теплоемкость воды приводит к меньшей амплитуде суточного хода температуры поверхности топи

-Разница температуры поверхности до 5°C между топью и грядой

-разница в потоках излучаемой ДВ радиации порядка 20 Втм^{-2}



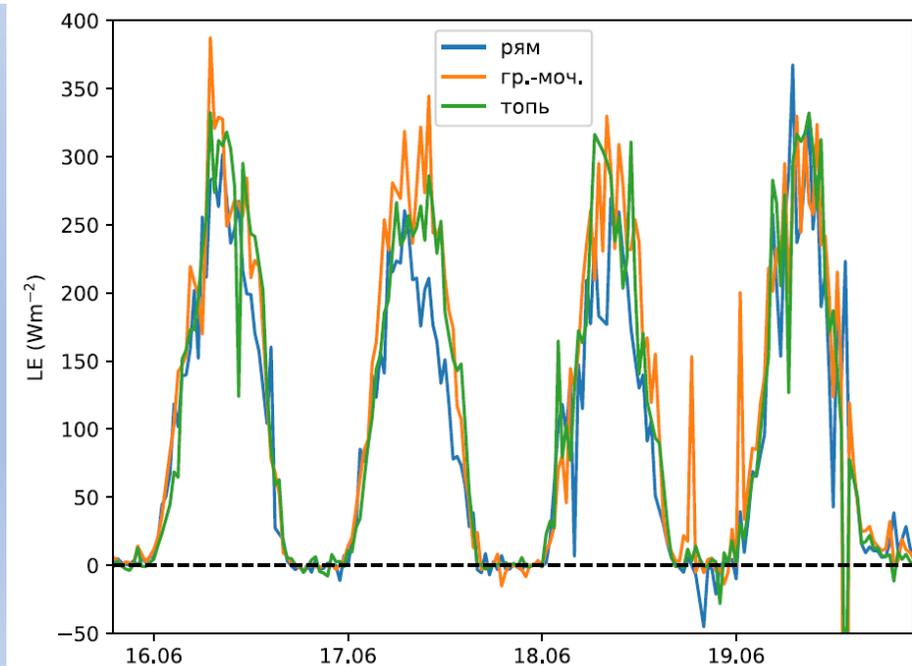
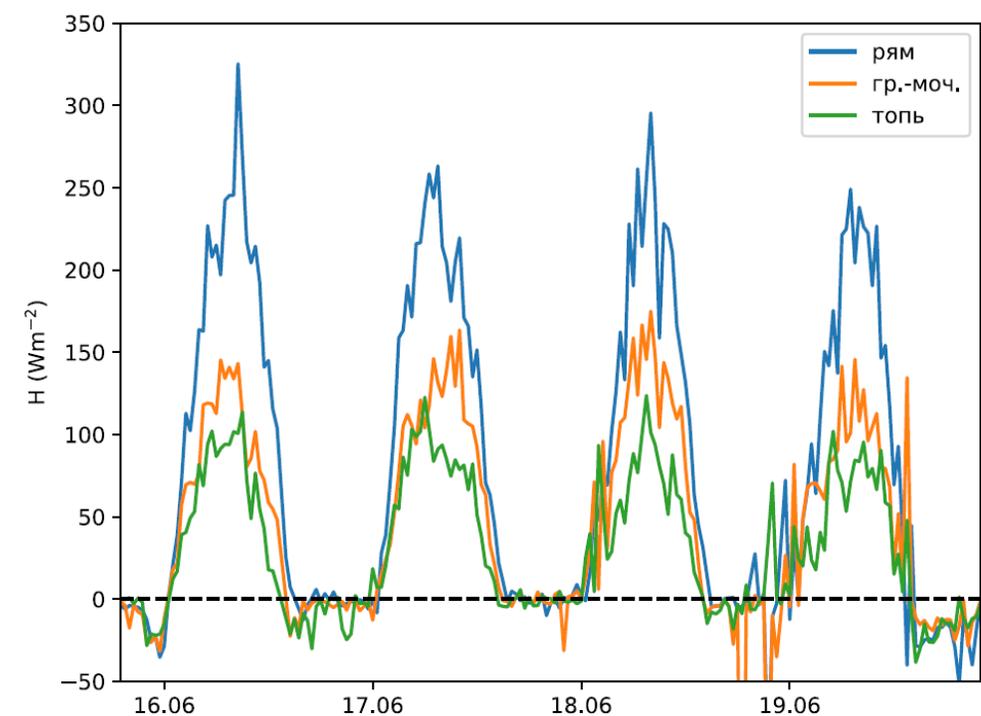
Потоки явного и скрытого тепла

Днем поток тепла над рямом превышает поток тепла над топью более чем в два раза, примерно на $100-150 \text{ Втм}^{-2}$

- разность температур, стратификация, шероховатость?

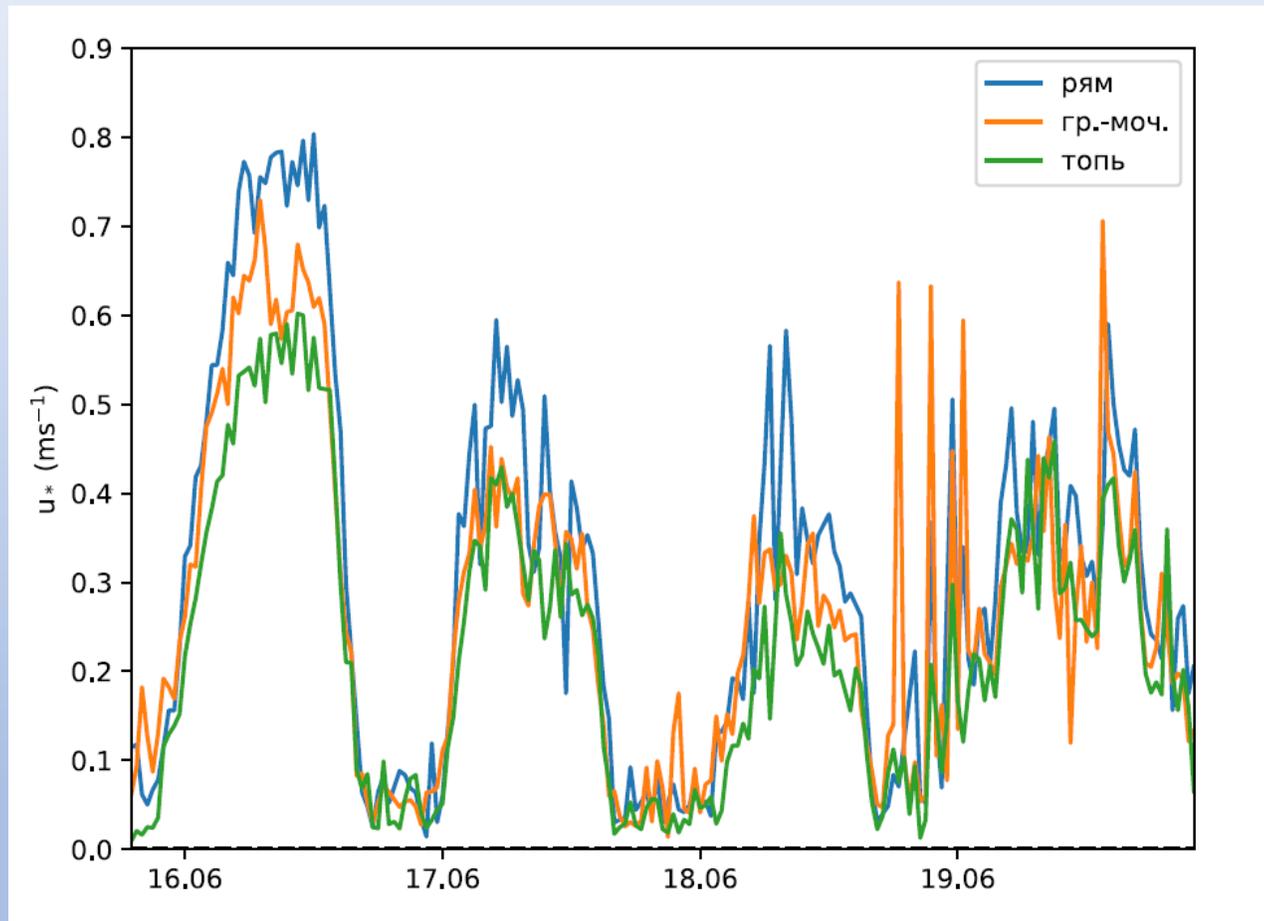
Днем поток скрытого тепла над рямом несколько меньше, чем над остальными элементами ландшафта, но различия не велики

- шероховатость, влажность почвы, стратификация, эвапотранспирация?



ТУРБУЛЕНТЫЙ ПОТОК ИМПУЛЬСА

Шероховатость ряма
самая высокая, топи —
самая низкая.



Построение тепловых изображений

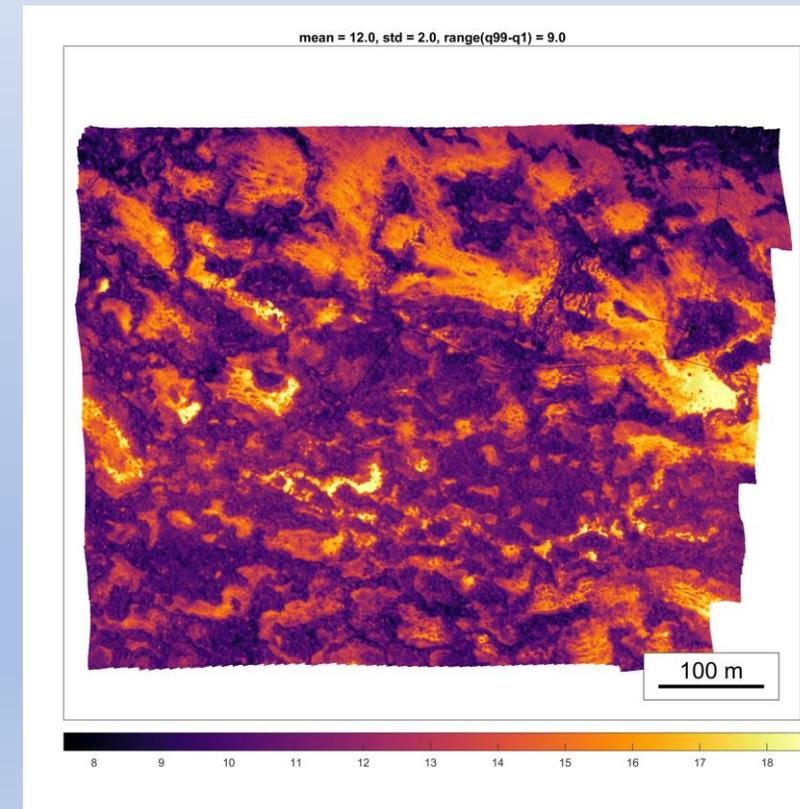
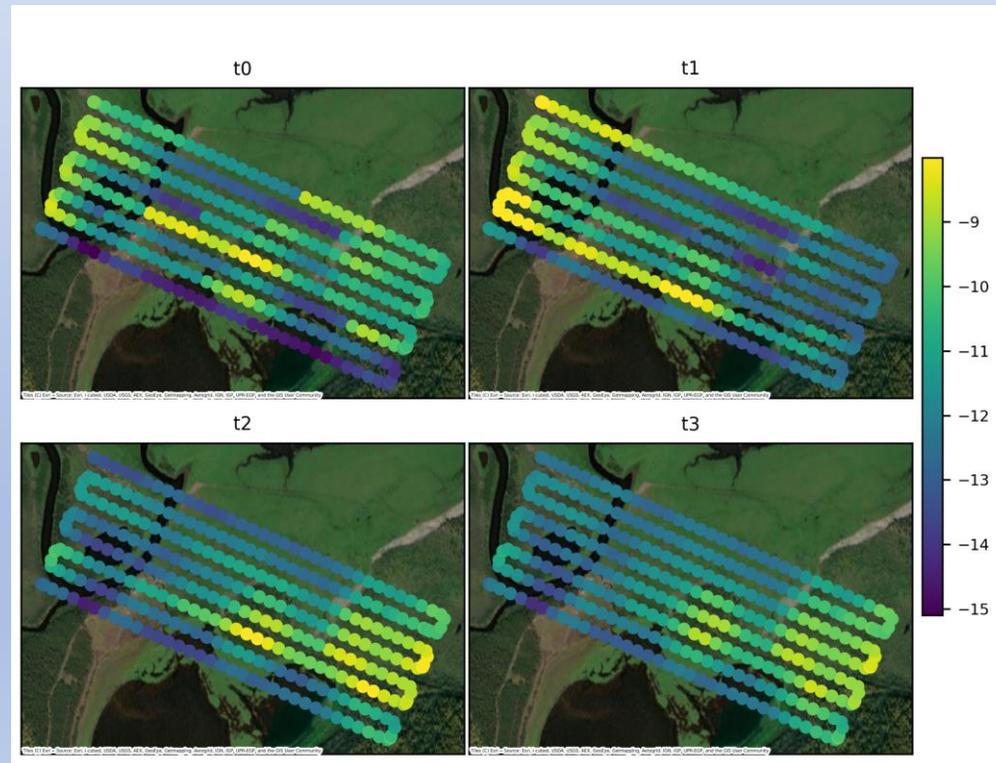
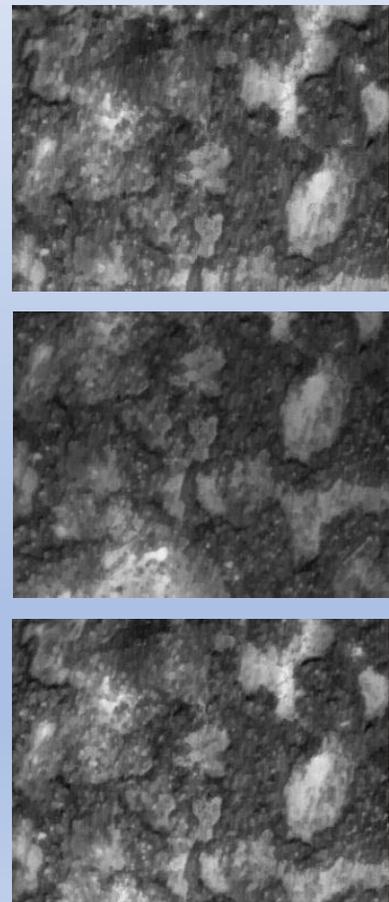


Сырые снимки с камеры

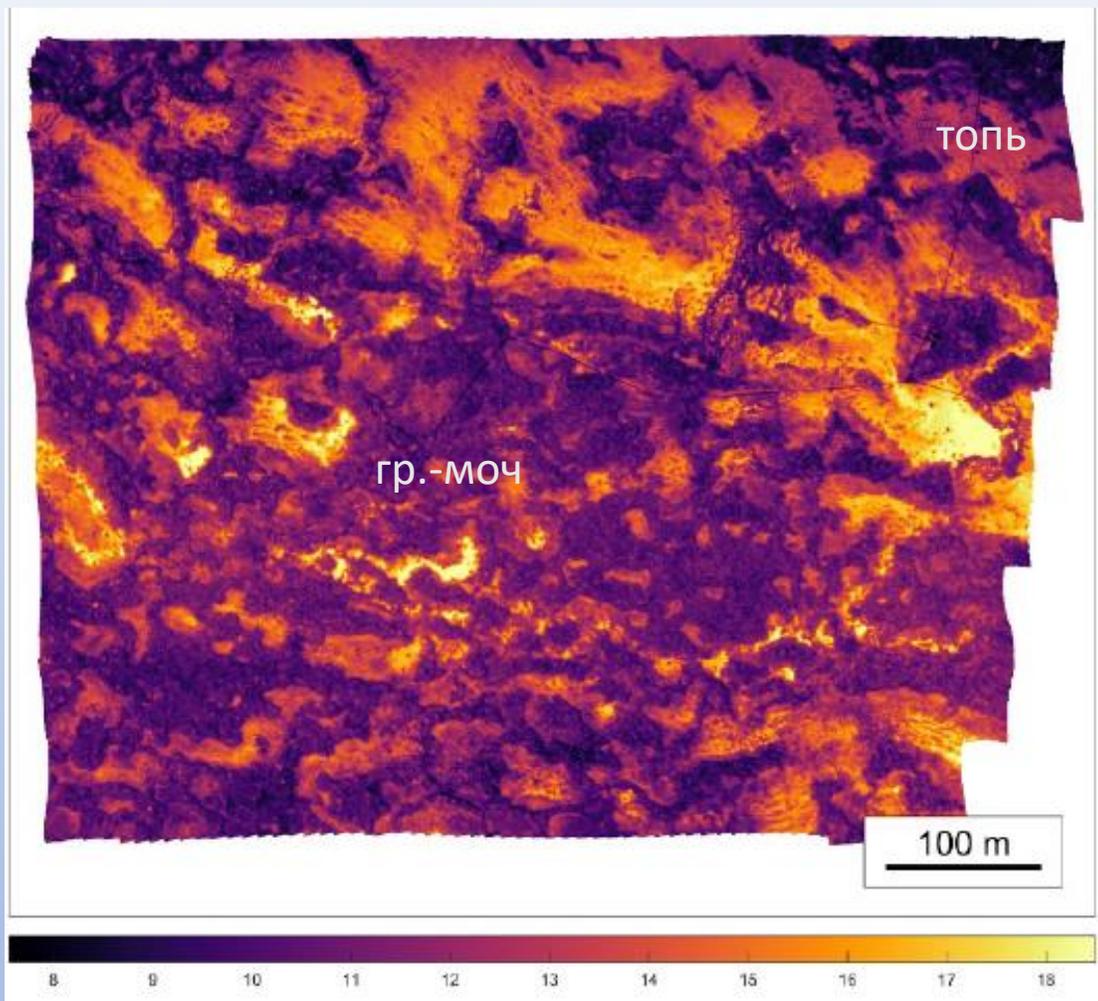
Удаление скачков температуры между соседними снимками

Удаление тренда вдоль сегмента маршрута

Сшивка отдельных снимков в карту

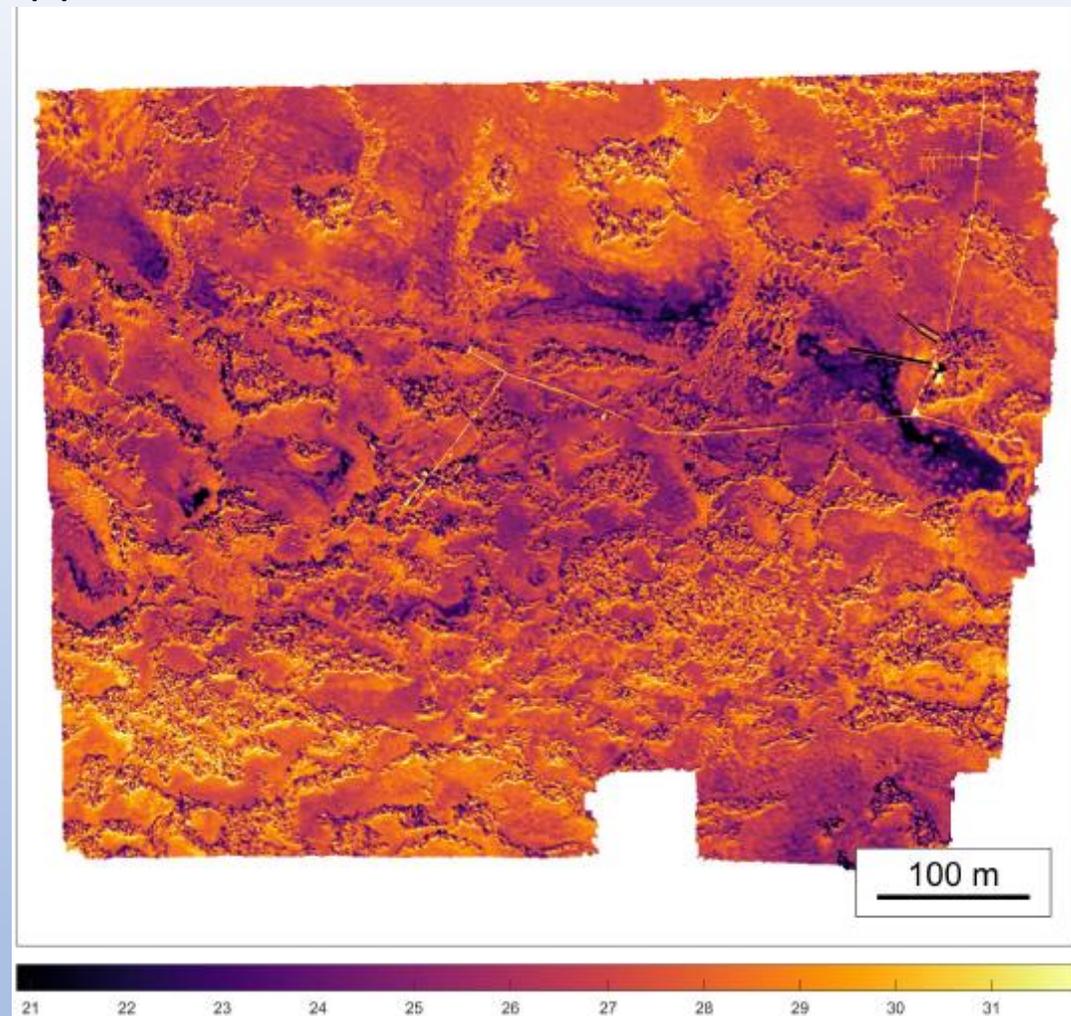


НОЧЬ:



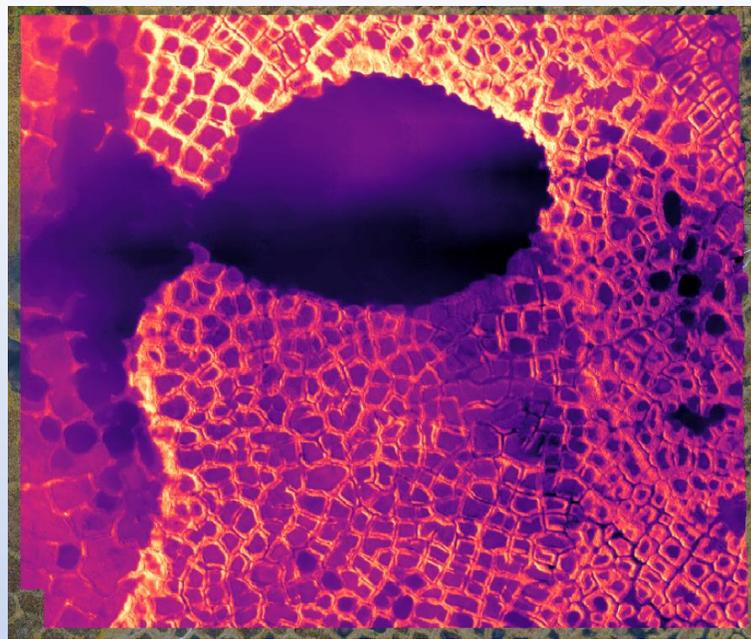
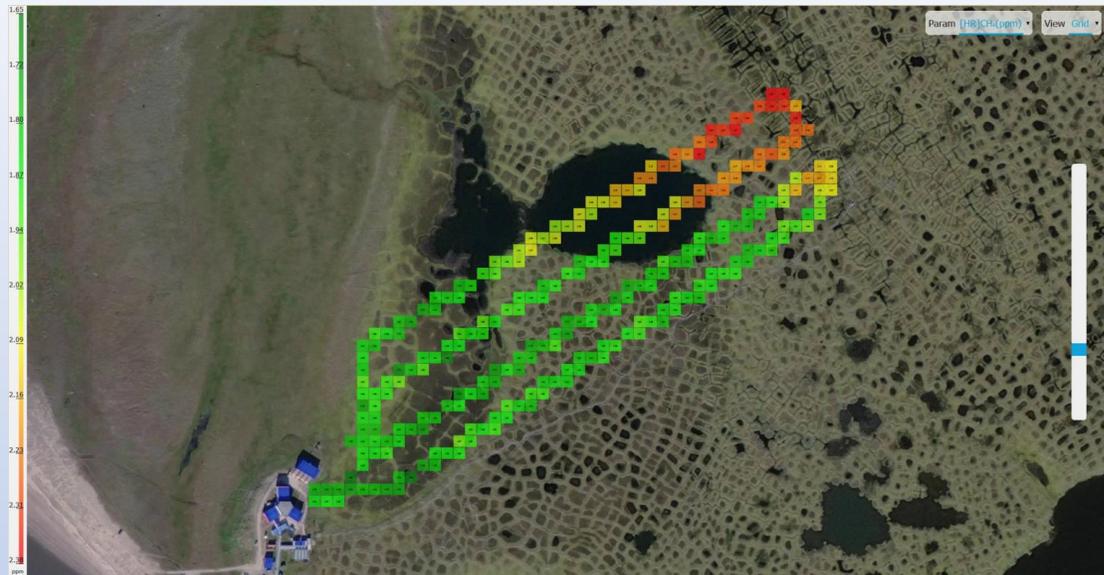
- холодные рям и гряды,
- теплые топи

день:

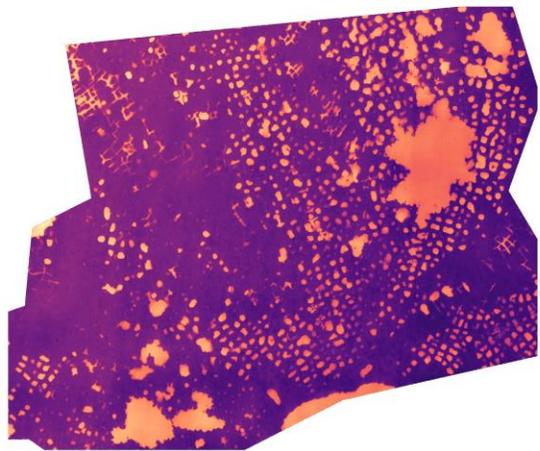


- теплые мочажины/гряды
- холодные топи

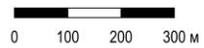
Концентрация метана над ландшафтом О. Самойловский



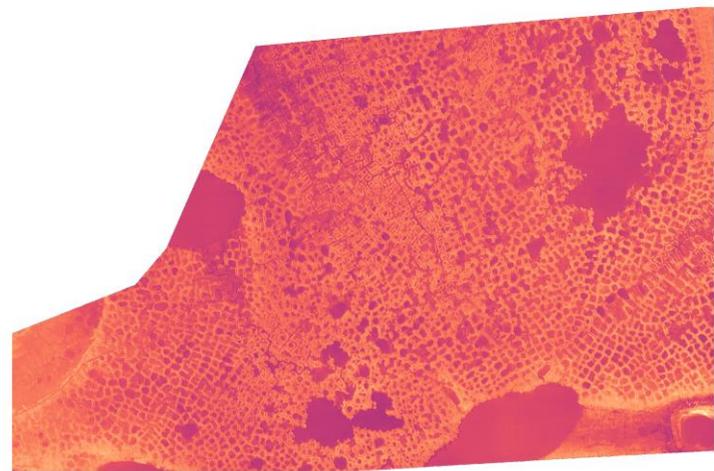
00:30 2.8.2024



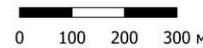
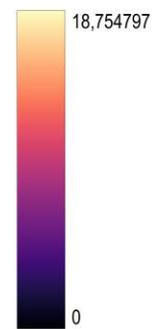
Температура поверхности, °C



15:30 31.7.2024

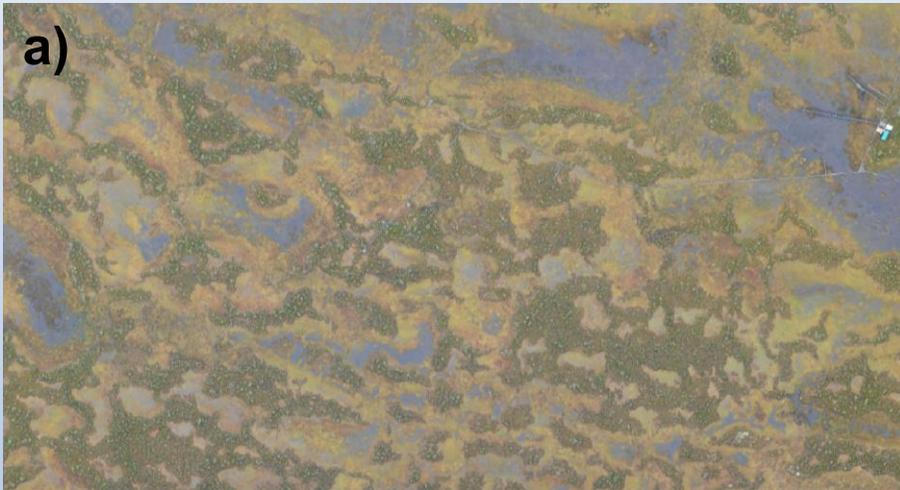


Температура поверхности, °C

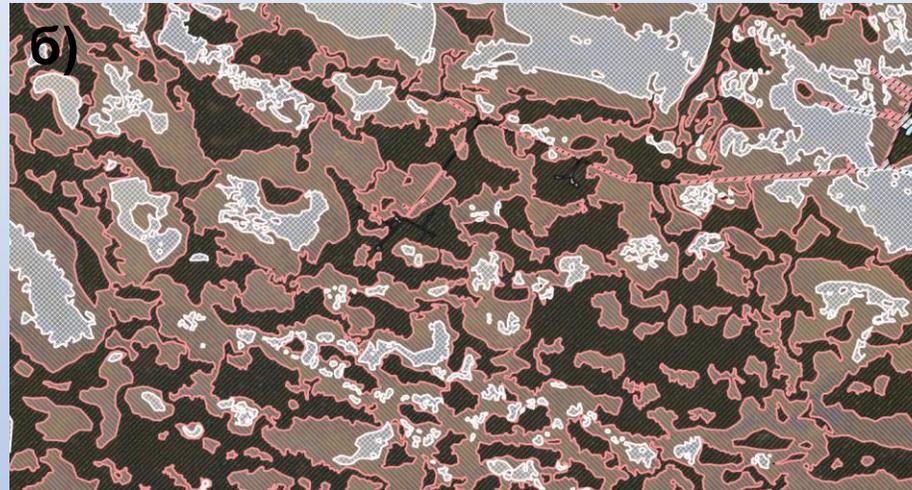


Chechin D. G. et al. Quantifying Spatial Heterogeneities of Surface Heat Budget and Methane Emissions over West-Siberian Peatland: Highlights from the Mukhrino 2022 Campaign //Forests. – 2024. – Т. 15. – №. 1. – С. 102.

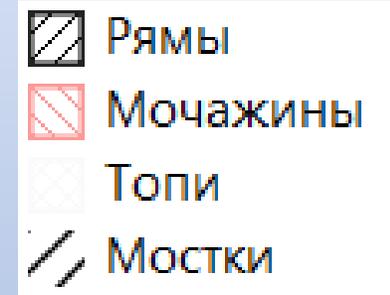
Ортофотосъемка плана местности



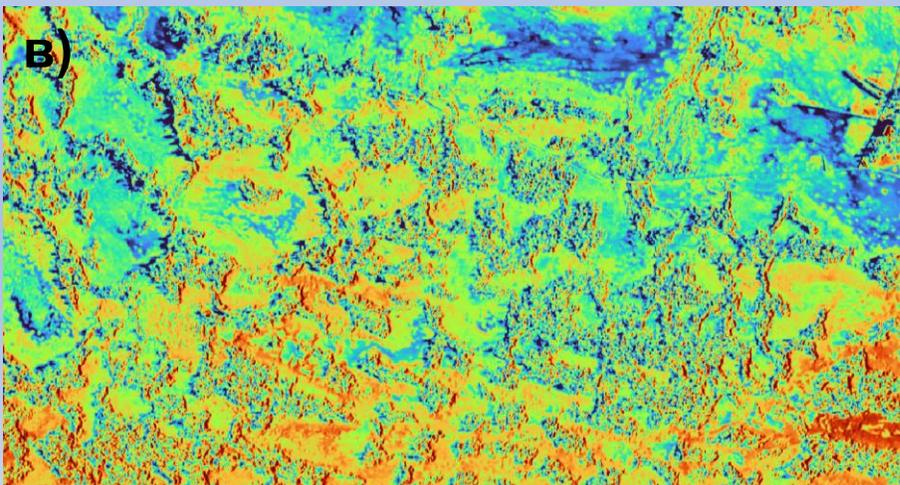
Оцифровка микроландшафтов



Условные обозначения выделяемых микроландшафтов:



Геопривязка ИК-снимка



Осреднение температур по полигонам



Температура поверхности

Поверхность	Mean T (°C)
Рям	15.1
Мочажина	12.7
Топь	10.4

Расчет потока тепла

Для расчета потока тепла
используется алгоритм
CUARE 3.6 (Edson et al., 2013)



$$Q_H = \rho C_H C_P [\theta_z - T_s] U_B$$

Балк формула для потока тепла

	Стандартный расчет	Расчет с учетом неоднородности поверхности
Температура поверхности	Средняя по полигону	Сумма характерных температур каждого микроландшафта с весами полученными из ФФП
Уровень шероховатости	Стандартное значение для болотной поверхности	Взвешенная сумма рассчитанных значений уровня шероховатости для каждого микроландшафта внутри ФФП

Результаты

Методология учета неоднородности болотной поверхности при расчете турбулентных потоков:



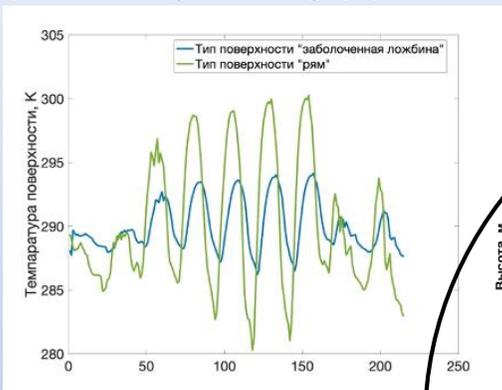
Оценка точности разработанной методологии учета термической неоднородности поверхности в модельном расчете потока тепла относительно измеренного потока:

Модель без учета ТНП	Модель с учетом ТНП	Измеренный поток тепла
0.63	0.79	1

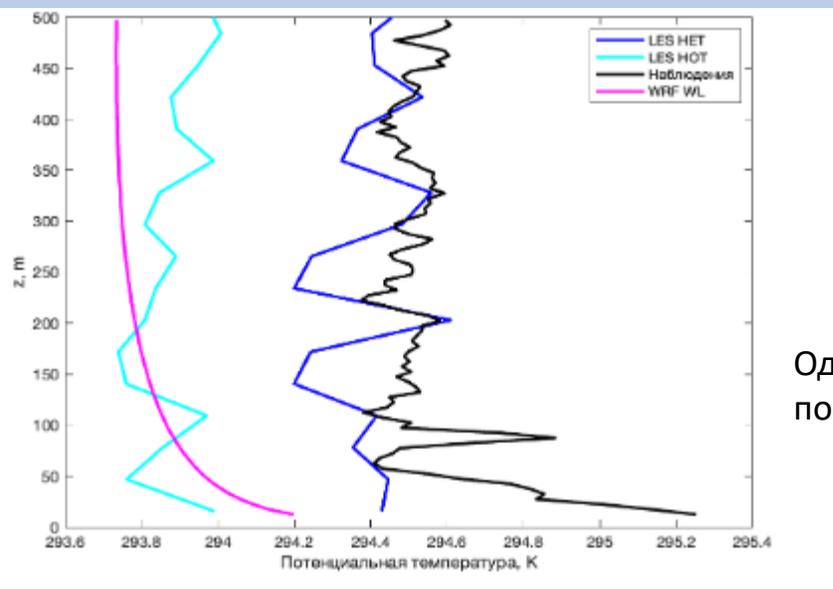
Вихреразрешающее моделирование

- Разработана конфигурация LES модели НИВЦ МГУ регионализации мезомасштабных моделей (WRF) для термически неоднородной поверхности

Идеализированная постановка для Мухрино два типа поверхности: "рям" и "заболоченная ложбина"

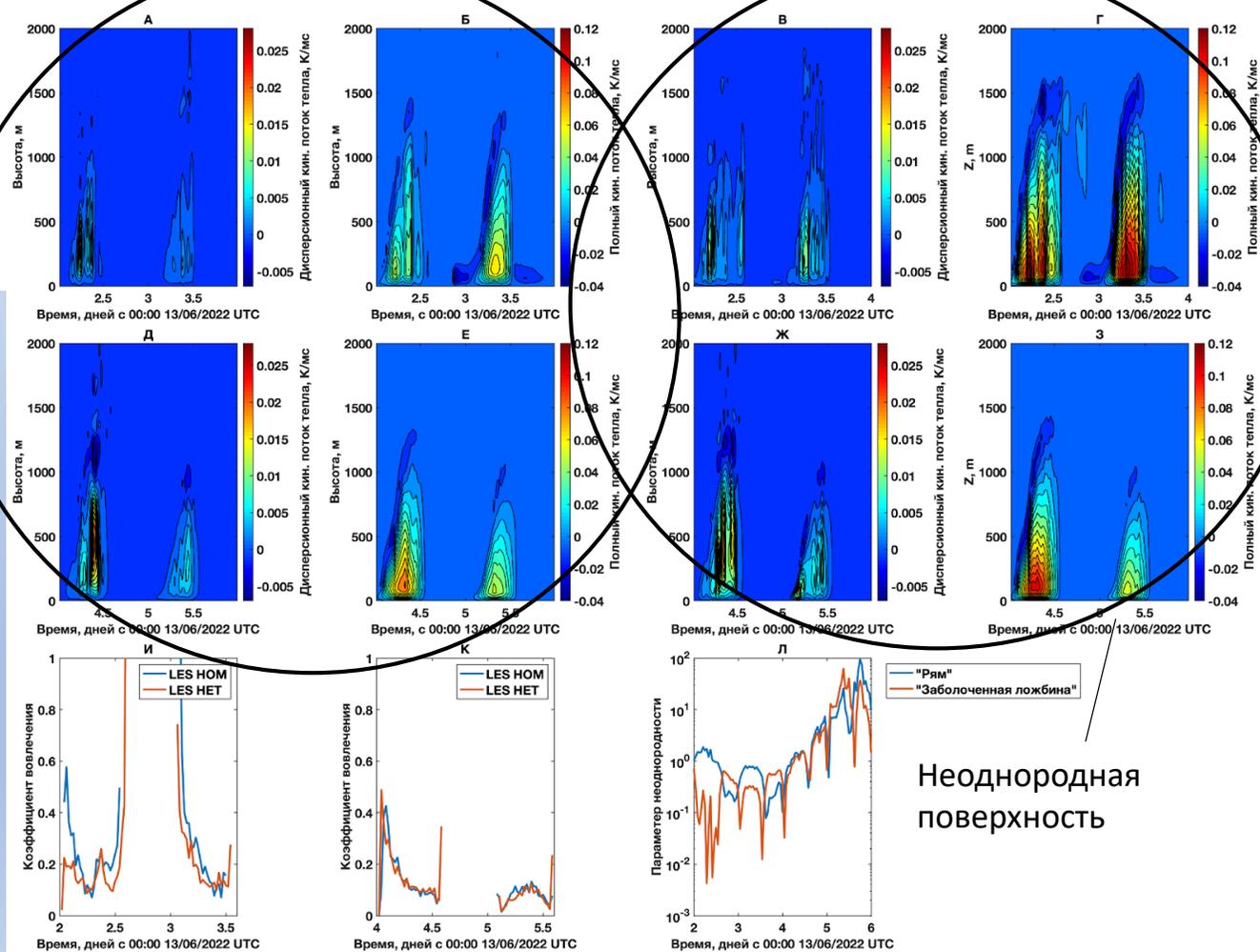


Согласованное с измерениями распределение скорости ветра и температуры в LES модели при учете неоднородности поверхности



Однородная поверхность

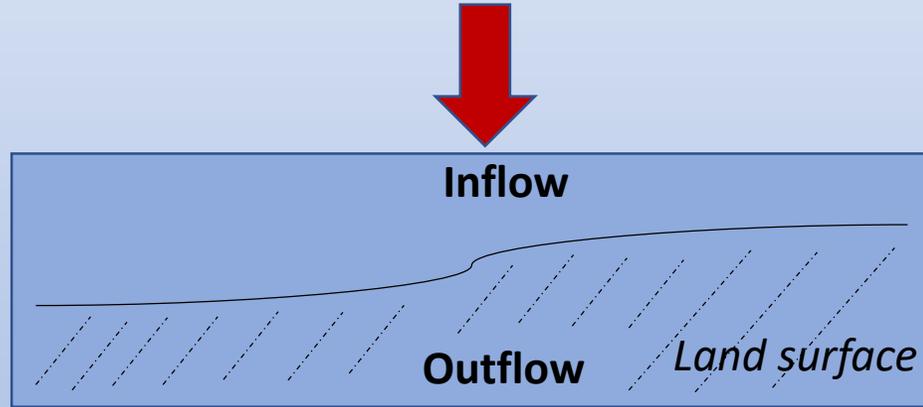
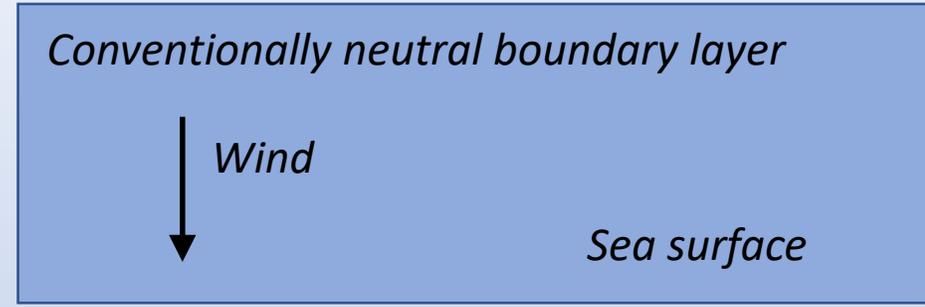
Оценки дисперсионных потоков для суточного хода



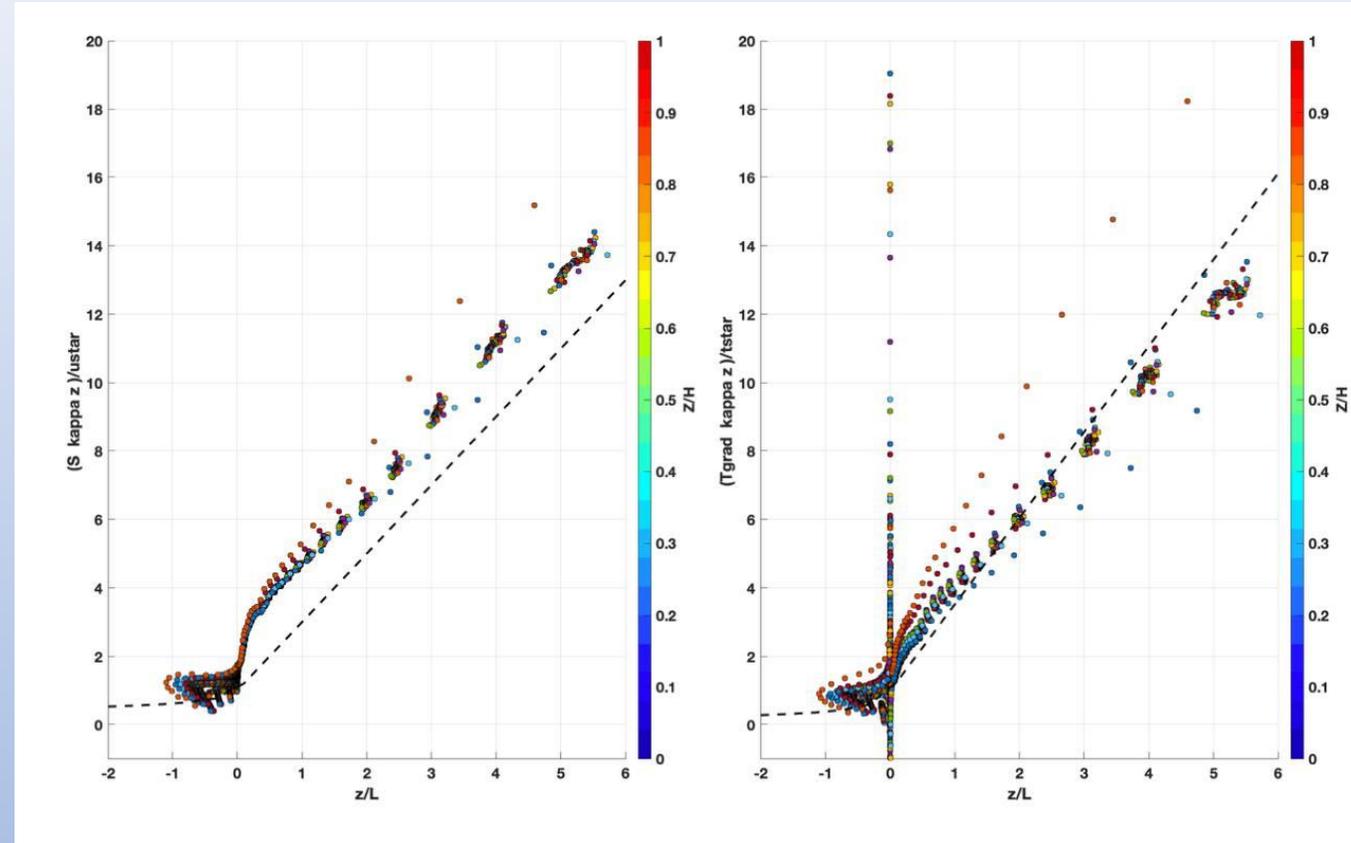
Неоднородная поверхность

Вихреразрешающее моделирование

- Прибрежная зона



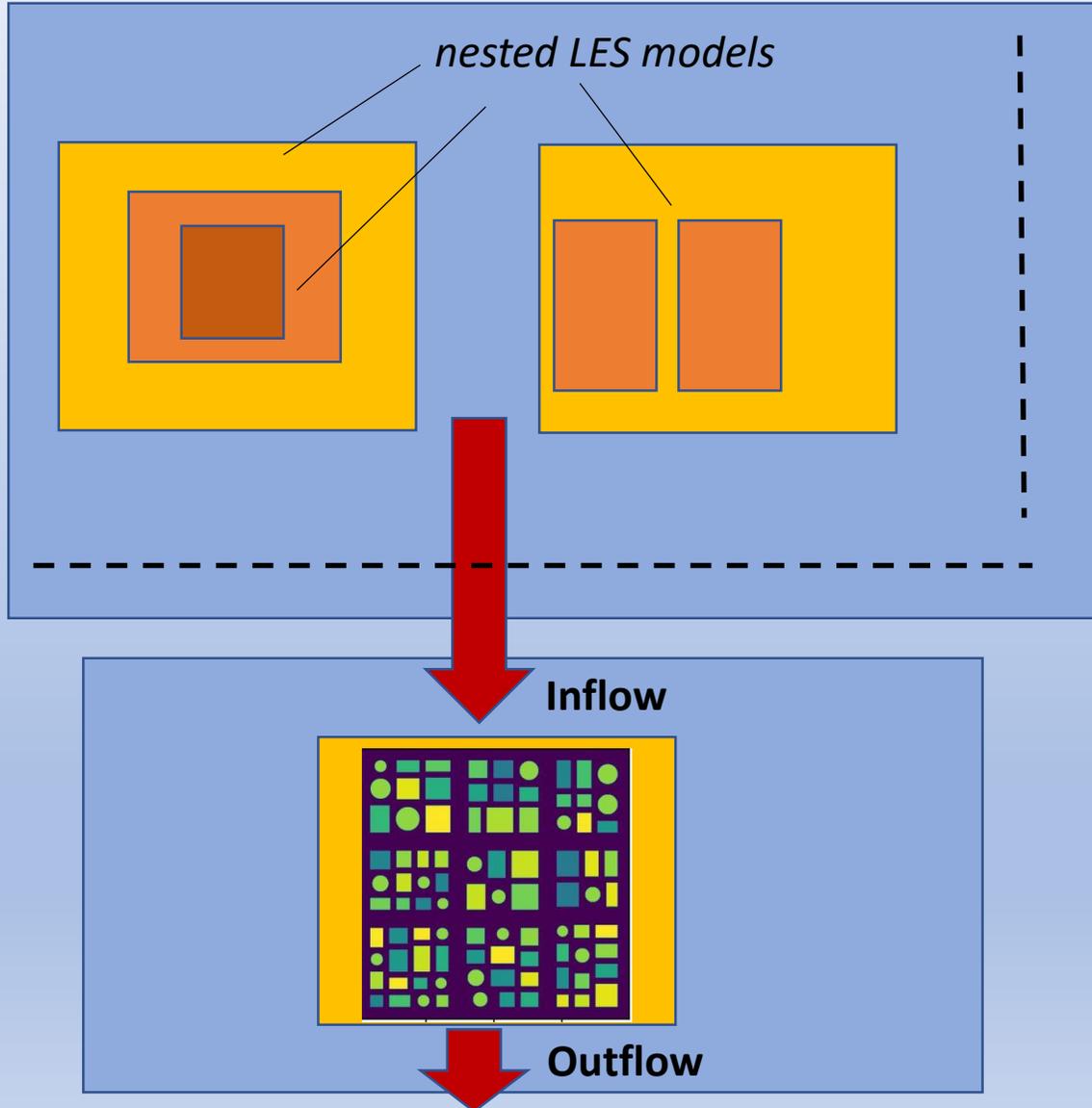
Предписанный поток тепла и шероховатость для поверхностей моря и суши



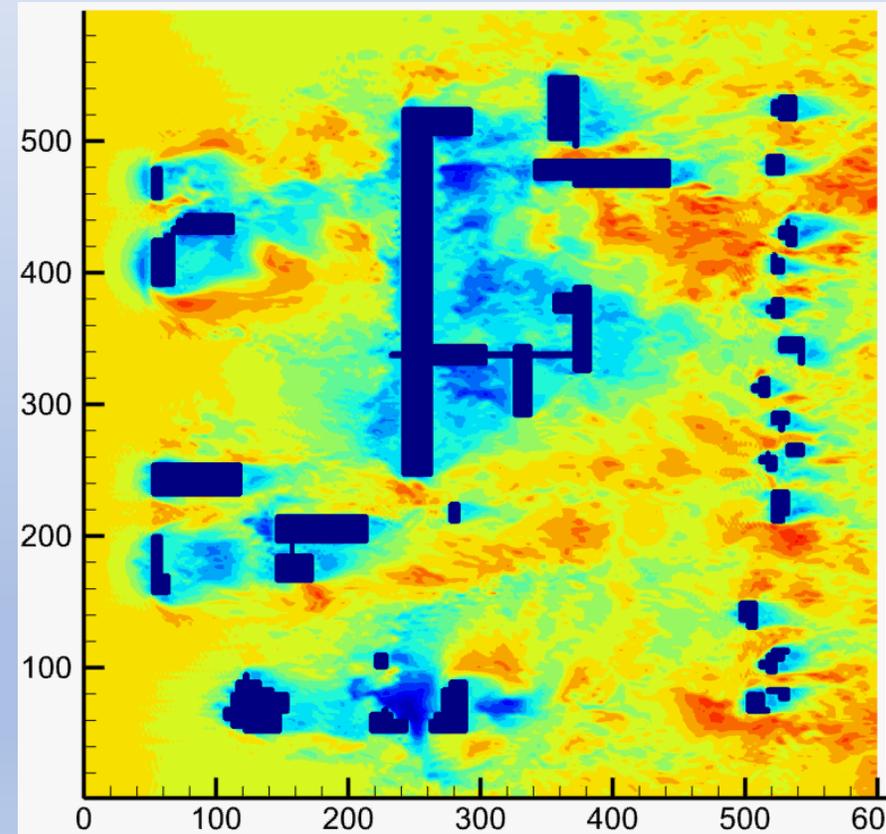
Безразмерные градиенты скорости и температуры по данным LES моделирования и для ТПО при использовании функций Бусинджера-Дайера (пунктирные линии)

Вихреразрешающее моделирование

- Технология расчета турбулентного потока в городской среде



Воспроизведение турбулентного потока для района ИМКЭС СО РАН



Спасибо

