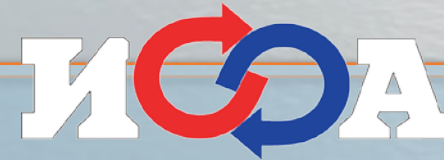


Взаимодействие атмосферы с неоднородной поверхностью по данным измерений и вихреразрешающего моделирования



Репина И.А.^{1,2}, Мортиков Е.В.^{2,1}, Дебольский А.В.^{2,1}, Чечин Д.Г.¹,
Барсков К.В.¹, Пашкин А.Д.¹, Артамонов А.Ю.¹, Варенцов М.И.^{2,1},
Варенцов А.И.^{2,1}, Гавриков А.В.³, Степаненко В.М.²

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

²Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН

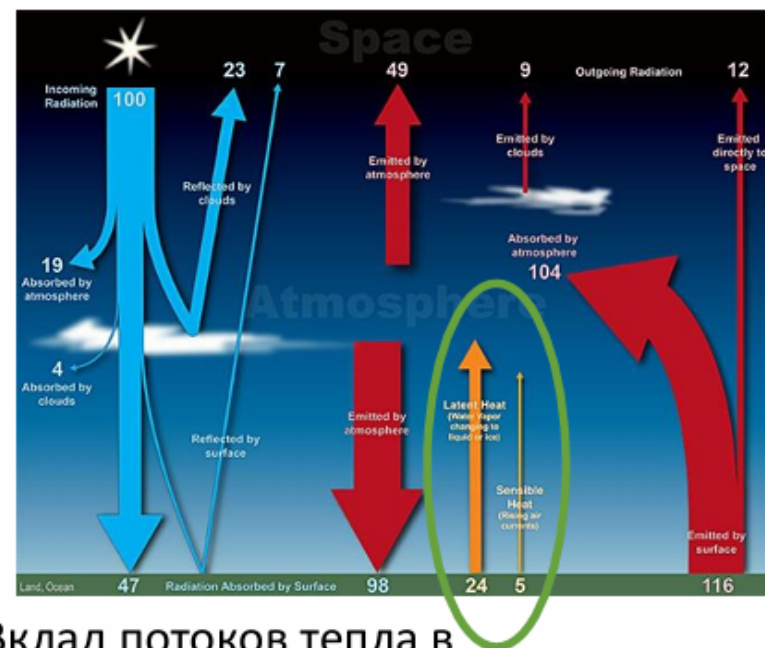
³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН



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)

А. С. МОНИН и А. М. ОБУХОВ

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Статья содержит анализ процессов перемешивания в турбулентной атмосфере на основе систематического применения методов теории подобия. В работе обобщены эмпирические данные о распределении скорости ветра при различных условиях температурной стратификации, и изложен метод расчета характеристик обмена на основе измерений скорости ветра и температурного градиента.

* *

*

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы физики приземного слоя занимают значительное место в метеорологических исследованиях за последние 10—15 лет. Закономерности процессов в приземном слое представляют интерес не только для агрометеорологии, изучающей влияние «метеорологической среды» на развитие растений, но имеют общее геофизическое значение, так как через приземный слой осуществляется динамическое взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности, «питание» атмосферы влагой и теплом.

Большой цикл исследований в области физики приземного слоя выполнен в Главной геофизической обсерватории — работы С. А. Сапожниковой [1], Д. Л. Лайхмана и А. Ф. Чудиновского [2], М. И. Будыко [3] и М. Т. Тимофеева [4] хорошо известны советским метеорологам.

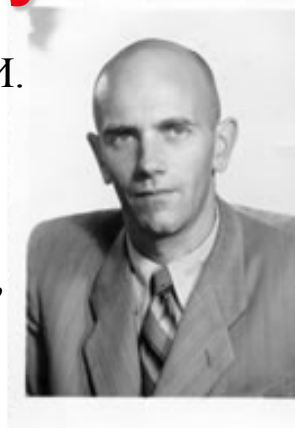
На основе этих исследований в настоящее время получен ценный материал наблюдений над распределением ветра, температуры и влажности в приземном слое, и составлен ряд конкретных предложений по методике расчета характеристик турбулентного обмена (М. И. Будыко, Д. Л. Лайхман).

Вместе с тем в теории процессов перемешивания в приземном слое имеется еще ряд спорных вопросов. Простейшая схема «логарифмического пограничного слоя», заимствованная из технической аэродинамики, хорошо описывает явления в безразлично стратифицированной атмосфере, что подтверждается большим эмпирическим материалом. Однако эта схема недостаточна для описания процессов в реальной атмосфере, где температурная неоднородность является существенным фактором, влияю-

Теория подобия Монина-Обухова

Создана на основе:

1. Экспериментальные работы Л.Д. Лайхмана и М.И. Будыко (1944, 1948)
2. Теория пристеночной турбулентности (логарифмический профиль ветра) (Prandtl, 1925)
3. Теория существования слоя вытеснения (Paeschke, 1937)
4. Масштаб (Длинна Обухова (Обухов, 1949)
5. π Теорема Букингема



Турбулентный режим на всех участках спектра, кроме интервала диссипации, полностью определяется тремя размерными параметрами:

$$\frac{g}{T_0}$$

$$u_* = \left(-\overline{u'w'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{Q}{c_p \rho} = \overline{w'T'}$$

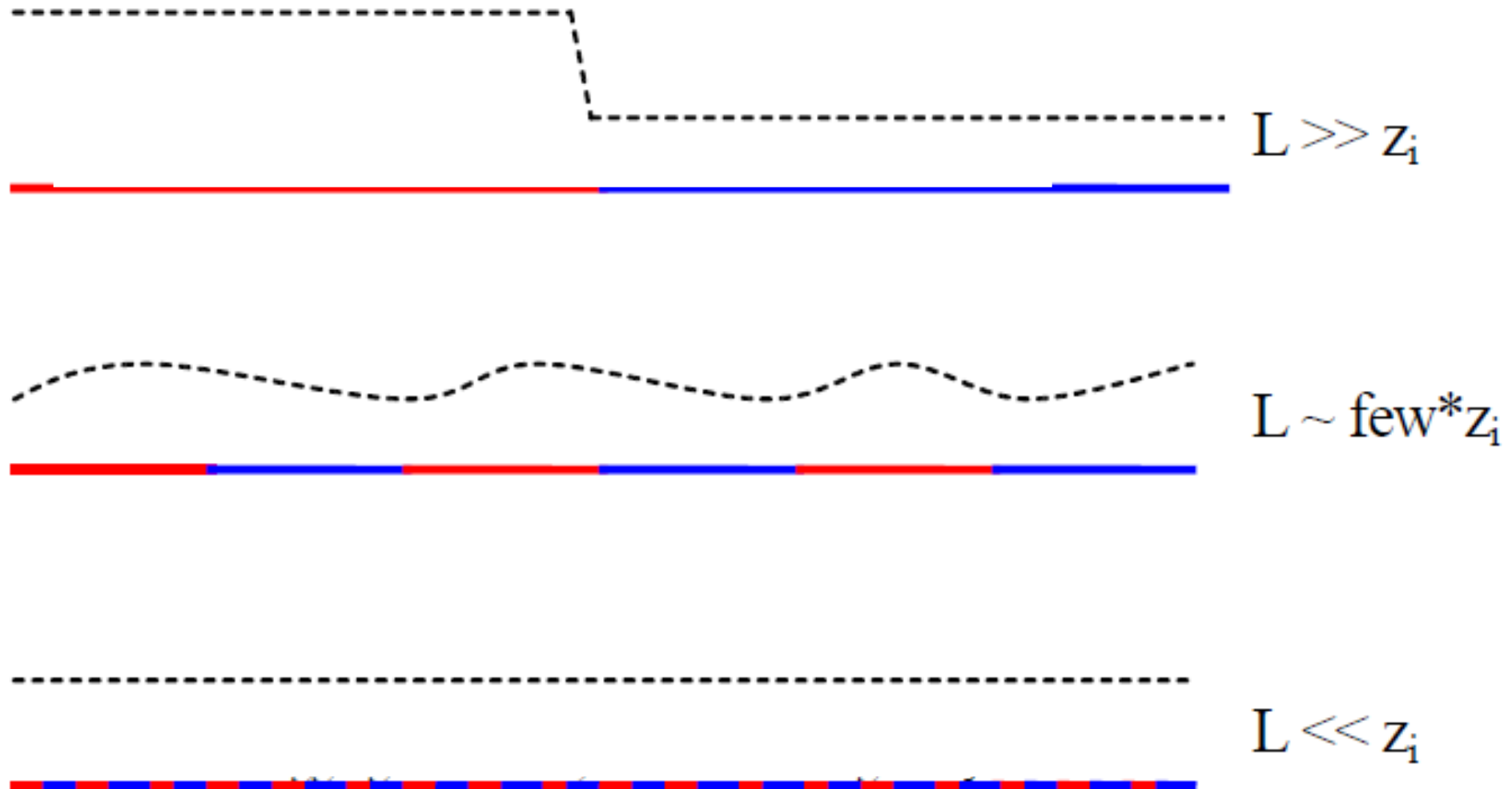
безразмерные профили средней температуры $\left(\frac{z}{T_*} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ и скорости ветра $\left(\frac{\kappa z}{u_*} \right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ зависят только от одной безразмерной переменной $\frac{z}{L}$

$$\left(\frac{z}{T_*} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \left(\frac{\kappa z}{u_*} \right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}, q(z) = f(\zeta) \quad \zeta = \frac{z}{L}$$

- ❖ Рельеф местности плоский и подстилающая поверхность достаточно однородна, так что поля скорости ветра и температуры однородны по горизонтали
- ❖ Никаких резких изменений погоды не происходит, и в течение интервалов времени, в которых естественный суточный ход погоды мало заметен, поля скорости ветра и температуры статистически стационарны.



Три режима взаимодействия неоднородной поверхности и атмосферного пограничного слоя

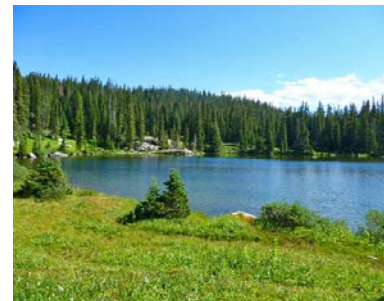


Неоднородные ландшафты

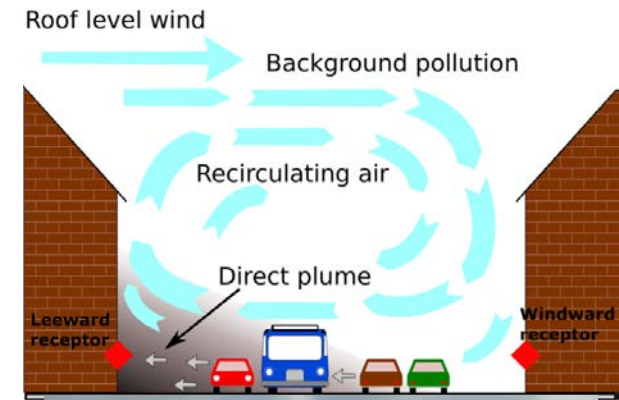


Водоёмы,
окружённые лесами,
Лесные поляны –
замкнутые
открытые пространства

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



Болотные ландшафты–
термические
неоднородности



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**

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.

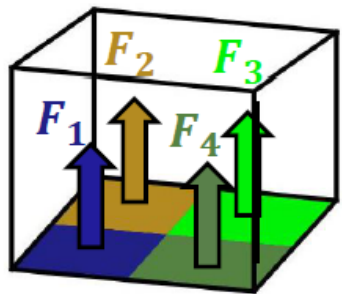
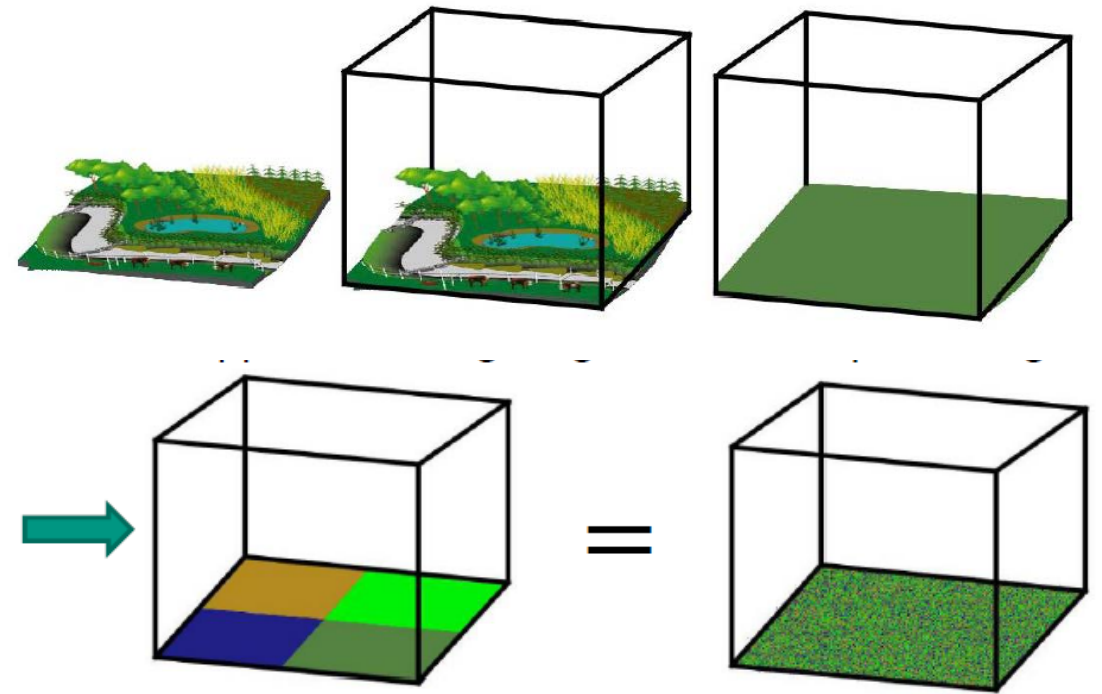
➤ В современных методах определения характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой используются теории, базирующиеся на гипотезе стационарности и однородности. Традиционно применяемые в атмосферном моделировании, энергобалансовых и биогеохимических расчетах параметризации основаны на выводах теории подобия Монина-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.

Неоднородная поверхность при моделировании

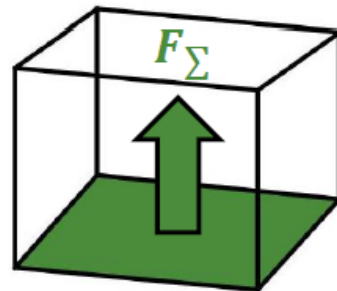
Метод решения проблемы – агрегирование потоков

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

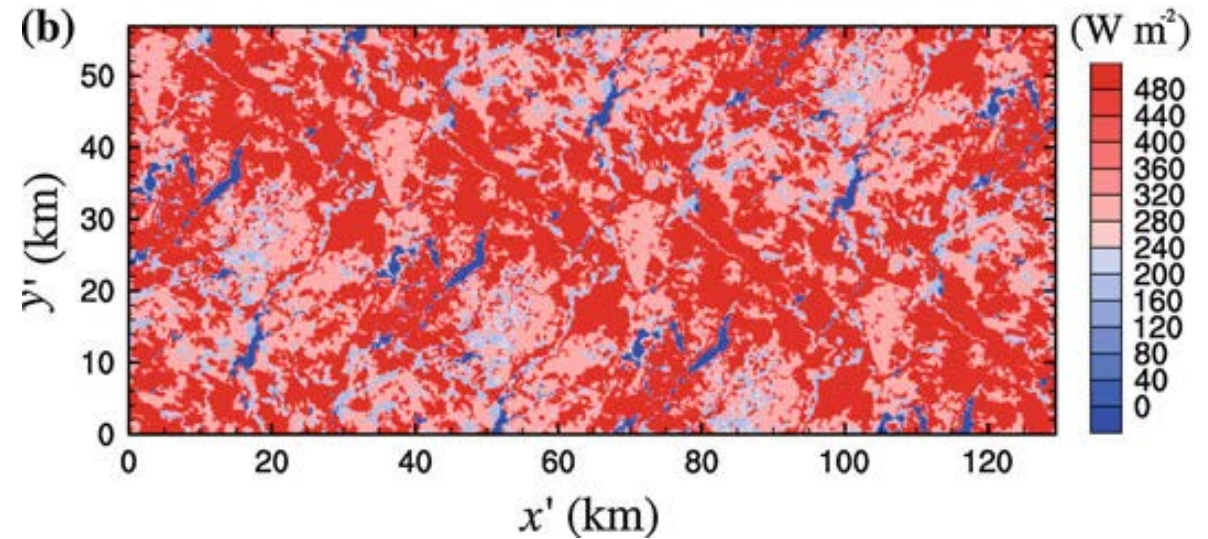
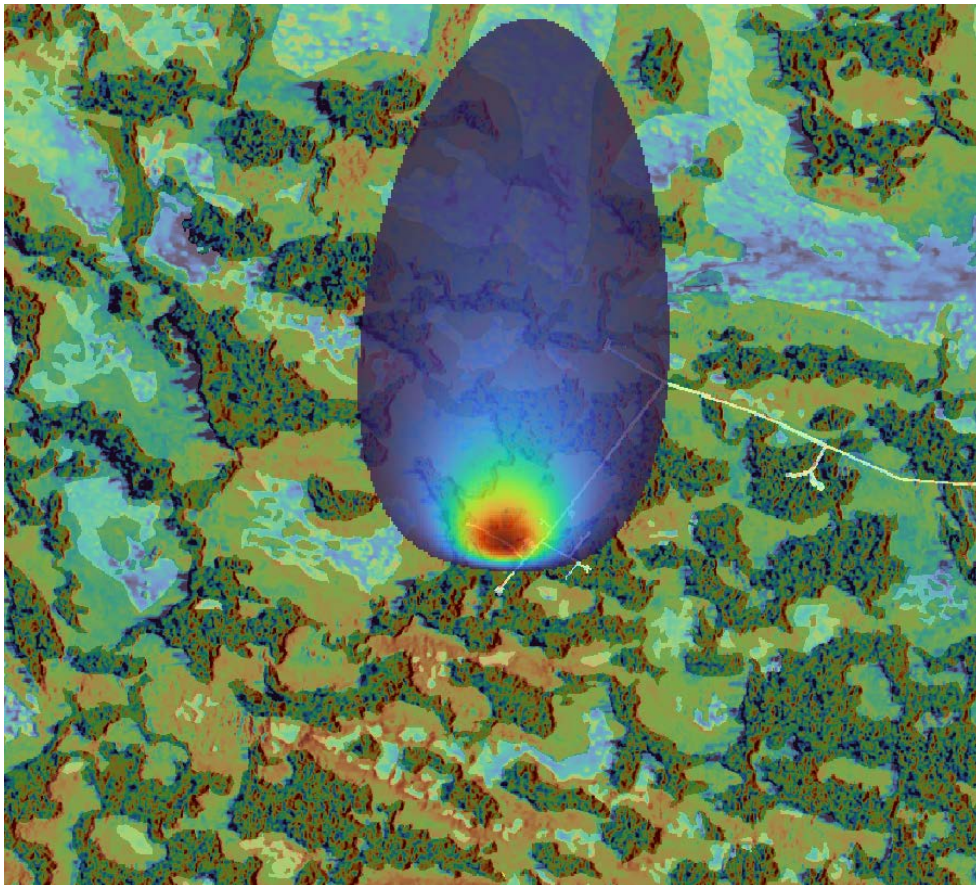
Разбивка поверхности
на микроландшафты

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

Затруднения применимости ТПМО над неоднородными ландшафтами связано с тем, что к локальному турбулентному перемешиванию, вызванному высокочастотной турбулентностью, здесь добавляются нелокальные процессы, вызванные неоднородностью генерации турбулентных движений и различными мезомасштабными циркуляциями.

Методы решения проблемы:

1. Включение в функции подобия новых независимых безразмерных групп
2. Введение новых эмпирических масштабов

Необходимо расширение формулировки теории подобия Монина-Обухова, которая должна включать параметры, влияние которых на потоки и их градиенты возможно: например параметр Кориолиса, высота пограничного слоя, разгон ветра, молекулярная вязкость и т.д.

Согласно Рі теореме такие параметры могут быть представлены как независимые безразмерные группы:

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots) \quad \pi_1 = z / L \quad \pi_2 = h / L \quad \pi_3 = xg / U^2 \quad \dots\dots$$

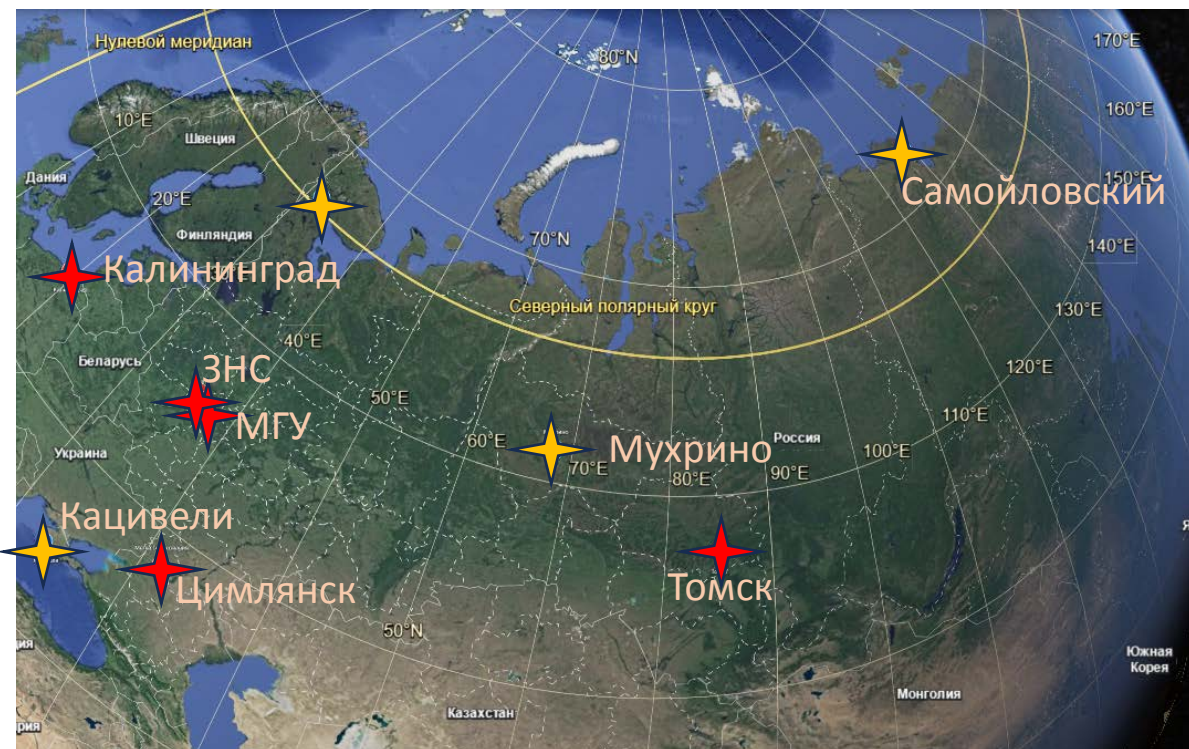
Реализация нового подхода возможна с включением в функции подобия новых независимых безразмерных групп (Grachev et al., 2018) или введением новых эмпирических масштабов

Laubach and McNaughton (2009) – в качестве базовых параметров предлагается использовать скорость диссипации турбулентной энергии и ее производные.

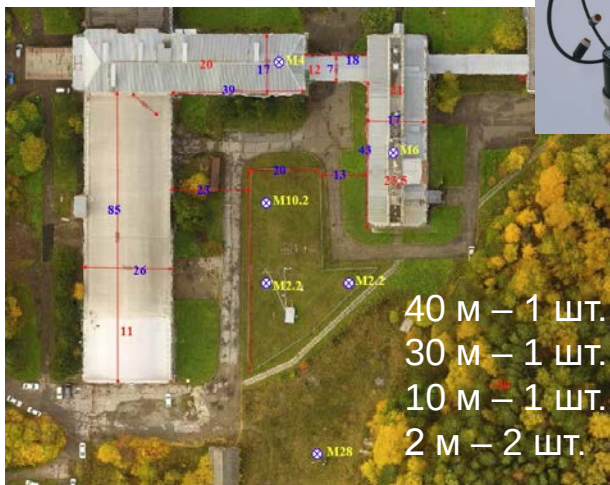
Stiperski and Calaf (2023) представили первое обобщенное расширение ТПМО, основанное на включении анизотропии турбулентности в качестве дополнительного безразмерного параметра.

Подход ММО (Multipoint Monin–Obukhov Similarity) (Tong, Ngueng, 2015) – масштаб Обухова используется как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

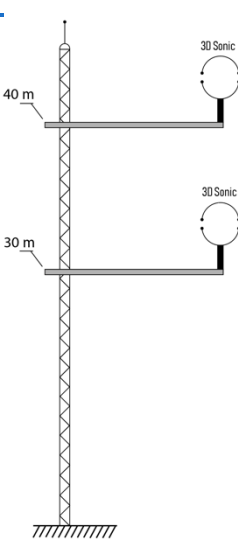
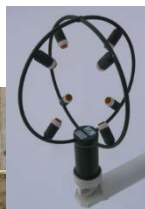
Измерительные площадки



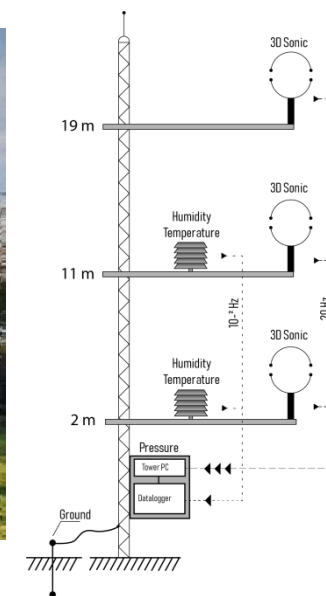
Томск, ИМКЭС СО РАН
2019-по н.в.



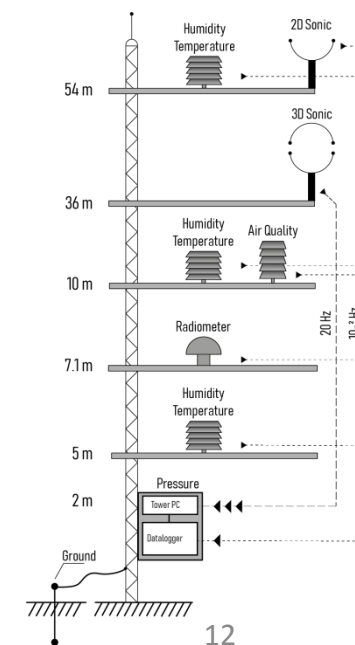
40 м — 1 шт.
30 м — 1 шт.
10 м — 1 шт.
2 м — 2 шт.



Москва, МГУ, 2019-по н.в.



Калининград, Пионерское, 2023-по н.в.



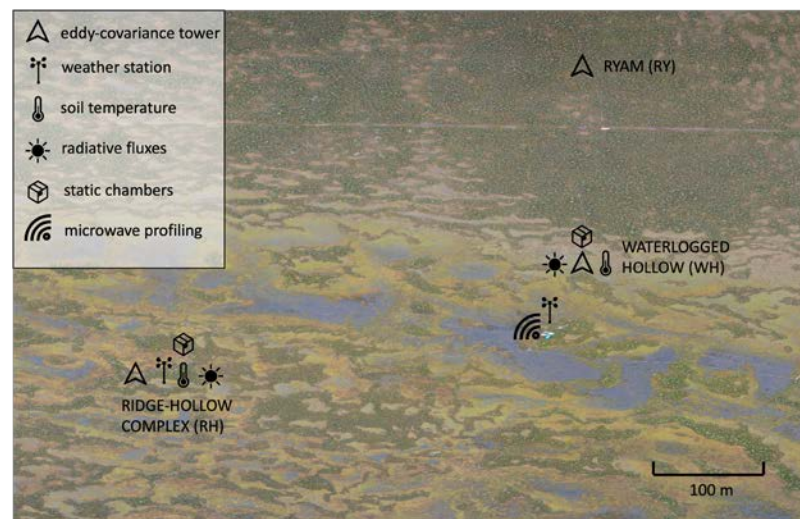
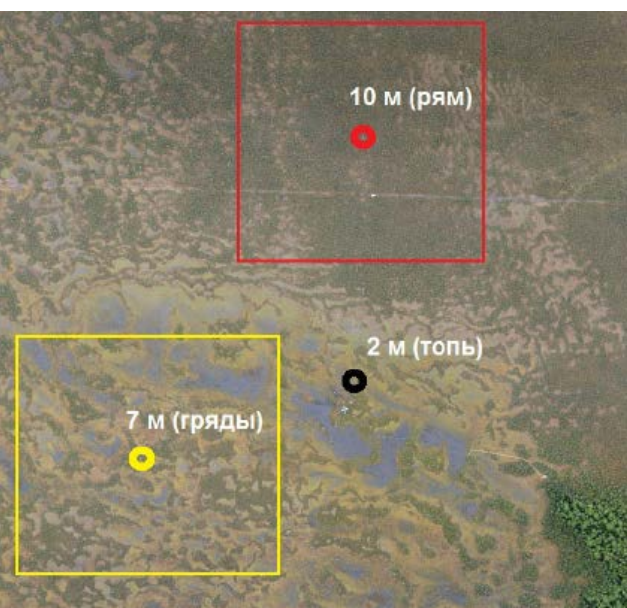
НЕОДНОРОДНОСТЬ БОЛОТНОГО ЛАНДШАФТА



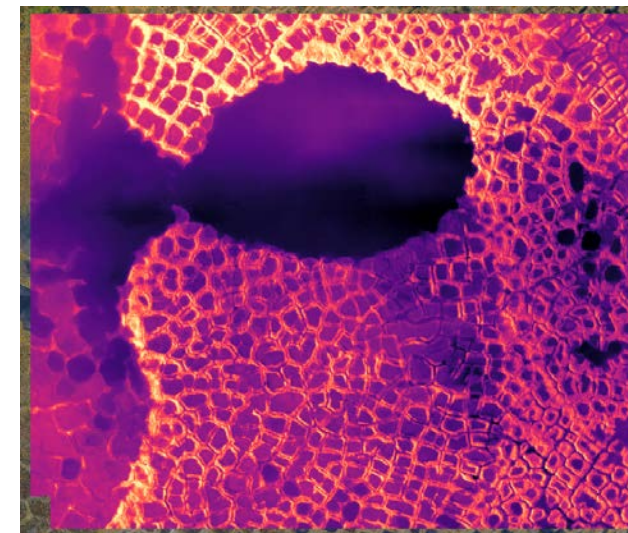
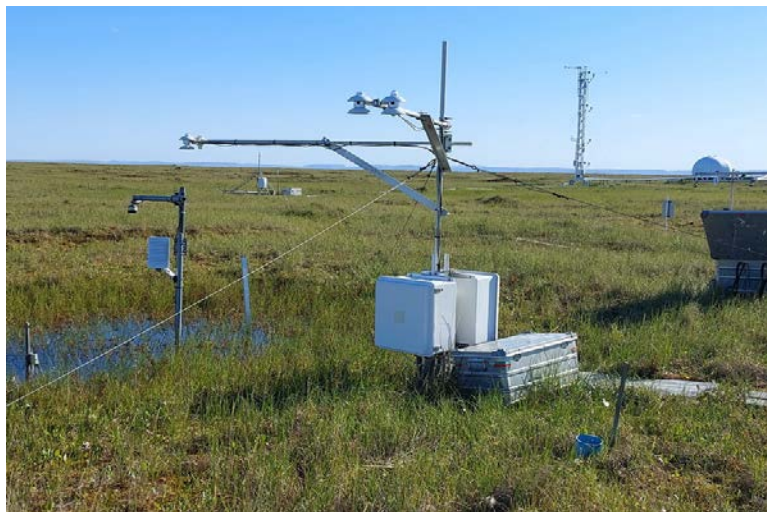
Болотные комплексы (I – Рям, II – Гряды-мочажинный комплекс, III – Гряды-мочажинно озерный комплекс, IV – реки и озера, V – открытые болота, VI – мозаичные болота, VII – болота в лесу, VIII – полигональные) и экосистемы в болотах (1 открытая вода, 2 – заболоченные участки (мочажины), 3 – олиготрофные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



Научно-исследовательская станция о. Самойловский:



Уравнение для потока тепла

Точное уравнение для вертикального турбулентного потока тепла $H = \overline{w'\theta'}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w \frac{\partial H}{\partial z} = \\ - \frac{\partial \overline{u'w'\theta'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'\theta'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'w'\theta'}}{\partial z} - \overline{u'_i\theta'} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x_i} - \overline{u'_i w'} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} - \\ \frac{1}{\rho_0} \overline{\theta' \frac{\partial p'}{\partial z}} + \frac{g}{\theta_0} \overline{\theta'^2} + \nu \overline{\theta' \nabla^2 w'} + \kappa \overline{w' \nabla^2 \theta'}, \end{aligned}$$

усечённый вариант которого для горизонтально однородного слоя записывается как:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} = \\ 0 + 0 - \frac{\partial \overline{w'w'\theta'}}{\partial z} - \overline{w'^2} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + 0 - \\ \frac{1}{\rho_0} \overline{\theta' \frac{\partial p'}{\partial z}} + \frac{g}{\theta_0} \overline{\theta'^2} + \nu \overline{\theta' \nabla^2 w'} + \kappa \overline{w' \nabla^2 \theta'}. \end{aligned}$$

Дивергенция турбулентного
потока тепла

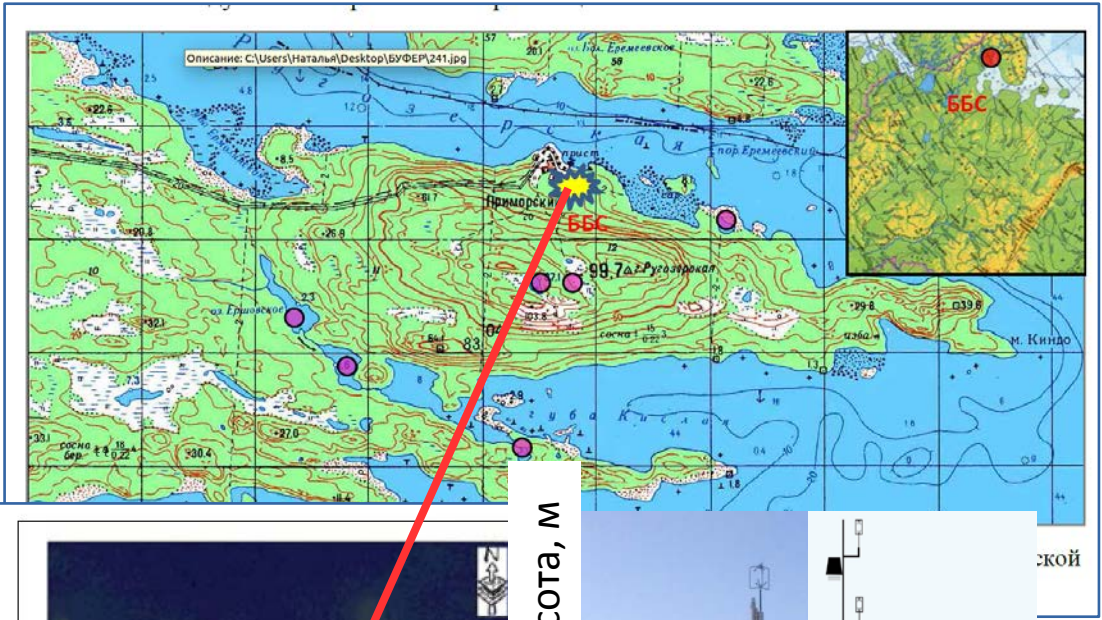
Связь вторых и третьих моментов

$$\underbrace{\frac{\partial \overline{w'\theta_v'}}{\partial t}}_I = - \underbrace{\overline{w'u'_k} \frac{\partial \overline{\theta_v}}{\partial x_k}}_{II} - \underbrace{\overline{u_k} \frac{\partial \overline{\theta_v'w'}}{\partial x_k}}_{III} - \underbrace{\overline{\theta_v'u'_k} \frac{\partial \overline{w}}{\partial x_k}}_{IV} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u'_kw'\theta_v'}}{\partial x_k}}_{V} + \underbrace{\overline{w'\kappa_T \nabla^2 \theta_v'} + \overline{\theta_v' \vartheta \nabla^2 w}}_{VI} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \overline{\theta_v'} \frac{\partial p'}{\partial z}}_{VII} + \underbrace{\frac{g}{T_0} \overline{\theta_v'^2}}_{VIII}$$

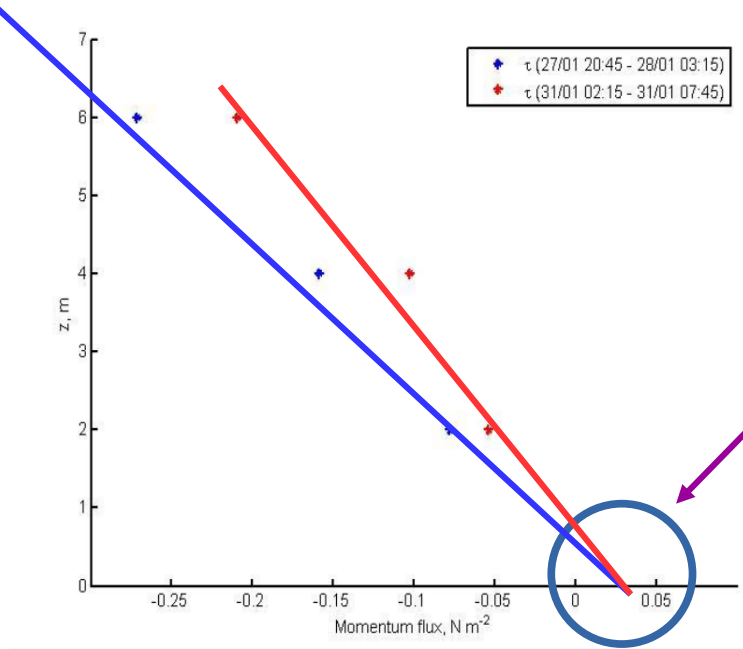
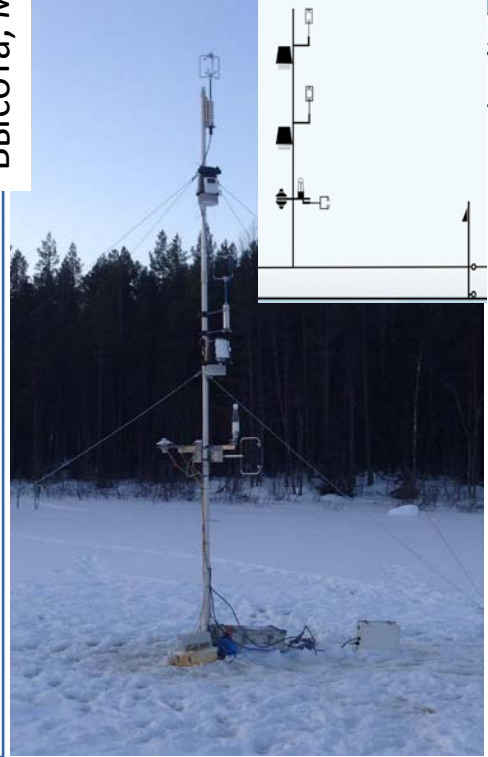
Гradient температуры
Адвекция потока
Вертикальный сдвиг ветра
Третьи моменты
диссипация
давление
Плавучесть

$\frac{z}{L} < 0$	$\frac{z}{L} > 0$
$\frac{\overline{w'w'T'}}{u_*u_*T_*} = C S_w \frac{\sigma_w}{u_*}, C \sim 1$ (Zilitinkevich et al. 1999, Abdella and McFarlane, 1997) $\frac{\overline{w'w'T'}}{u_*u_*T_*} \approx A_1(-\zeta)^{1/3}, A_1 \approx 1.25 - 1.30 \text{ (Wyngaard et al., 1971)}$ $S_w = B_1 \approx 0.3 - 0.5 \text{ (Монин и Яглом 1971, Chiba 1978, Maurizi and Tampieri 2013,)}$ $\frac{\sigma_w}{u_*} = C_1(1 - 3\zeta)^{1/3}, C_1 = 1.25 - 1.30 \text{ (Фокен 2017)}$ $\frac{\overline{w'w'T'}}{u_*u_*T_*} \rightarrow A_1(-\zeta)^{1/3}, S_w \rightarrow B_1, \frac{\sigma_w}{u_*} \rightarrow C_1 3^{1/3}(-\zeta)^{1/3} \text{ для } \zeta \rightarrow -\infty$ $C = \frac{A_1}{3^{1/3} B_1 C_1} \cong 1.2 - 2.4$	$\frac{\overline{w'w'T'}}{u_*u_*T_*} = A_2, A_2 \approx 0.55 \text{ (Kader and Yaglom 1990),}$ $S_w = B_2, B_2 = 0.05 - 0.10$ $\frac{\sigma_w}{u_*} = C_2, C_2 \approx 1.25 - 1.50 \text{ (Ariel and Nadezhina 1977; Caughey et al. 1979; Kader and Yaglom 1990; De Bruin et al. 1993)}$ $\zeta \rightarrow -\infty$ $\frac{\sigma_w}{u_*} = C_3(1 + 0.2\zeta)$ $S_c = \frac{\overline{c'^3}}{\overline{c'^2}^{3/2}}$

Измерения на озёрах побережья Белого моря

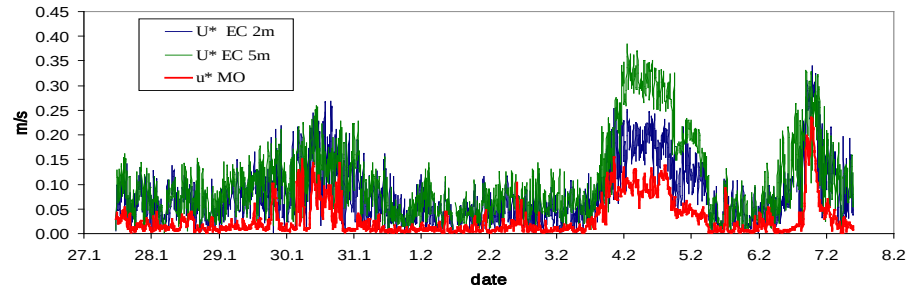
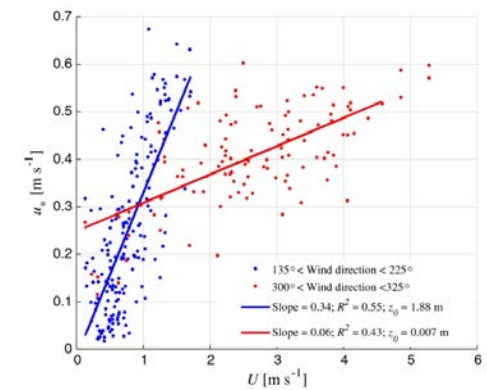


Высота, м



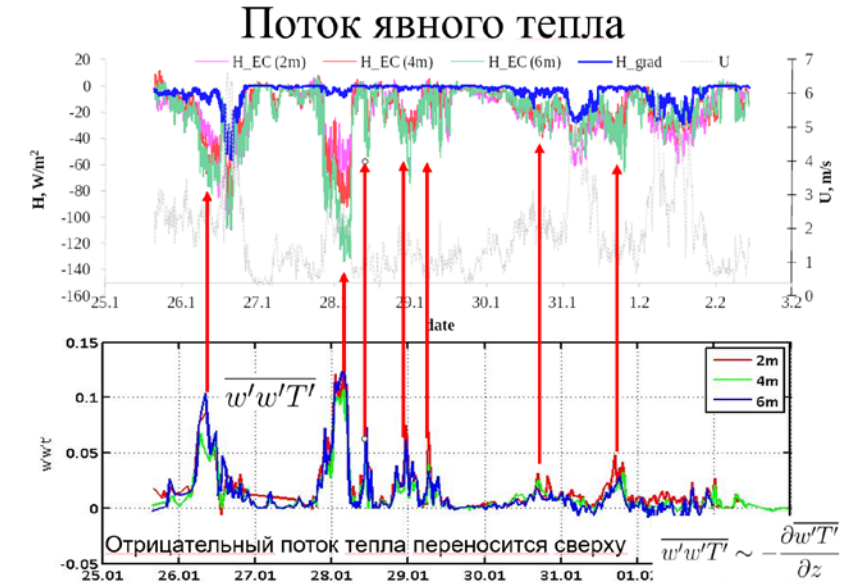
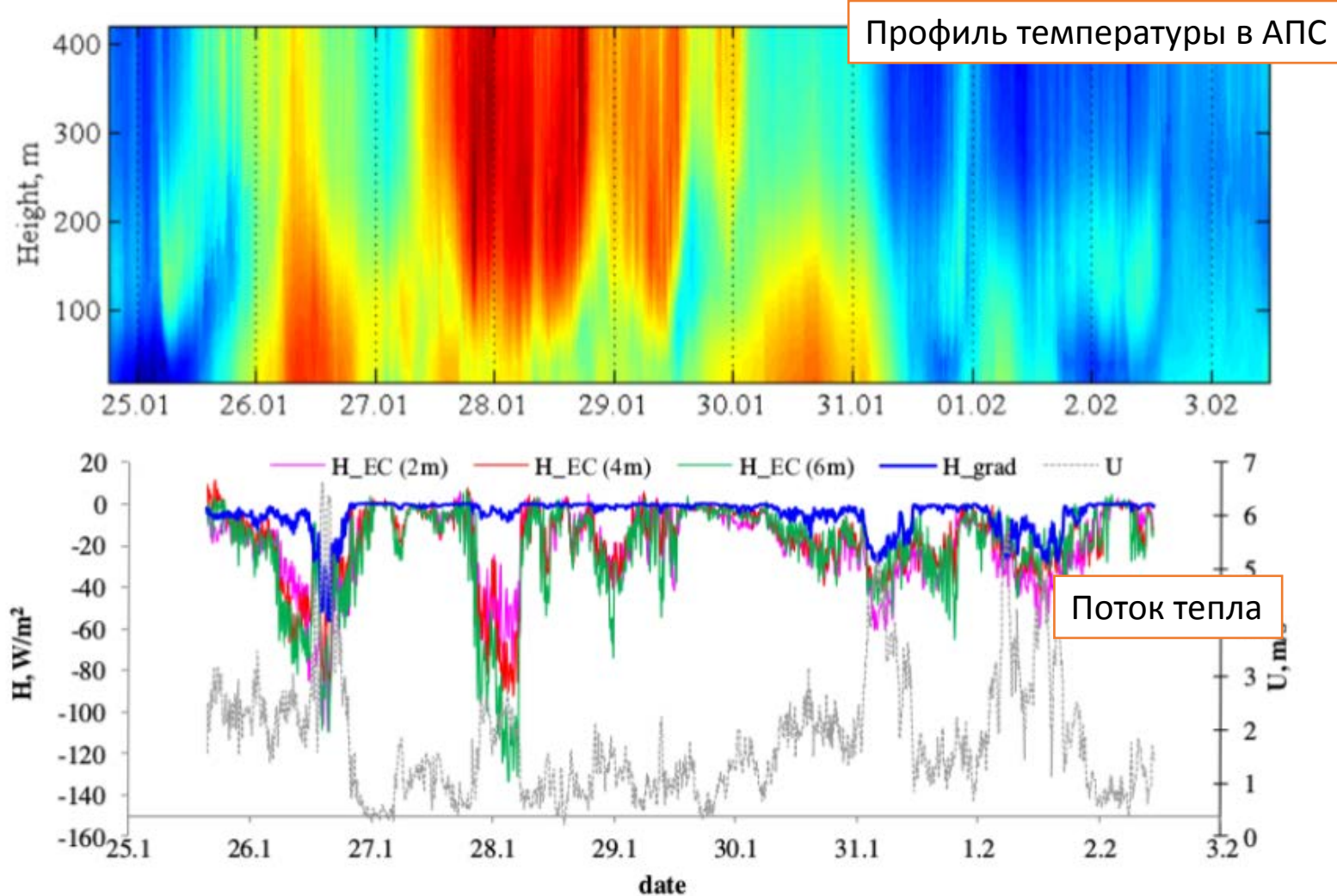
Поток импульса на поверхности много меньше потока импульса на стандартных уровнях измерений

Профиль потока импульса, измеренного методом турбулентных пульсаций.



- 1) Поток импульса изменяется с высотой.
- 2) При нулевом ветре поток не равен 0 даже при устойчивой стратификации.

Поток явного тепла

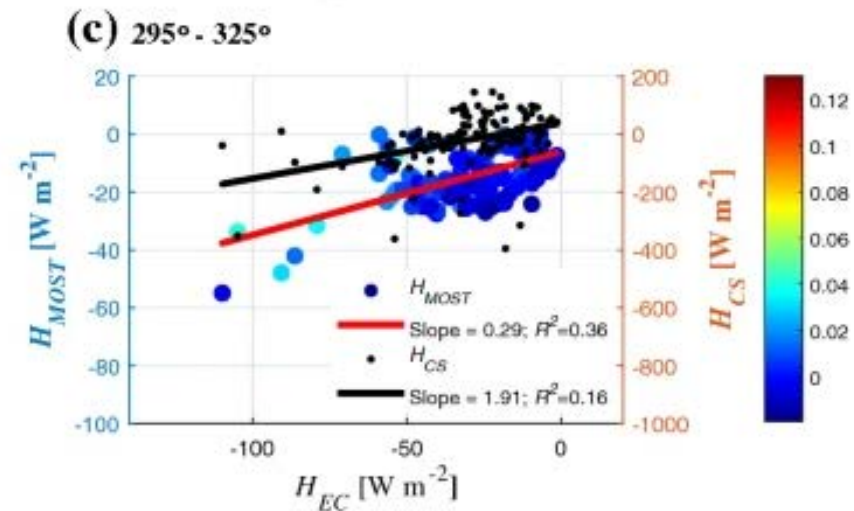
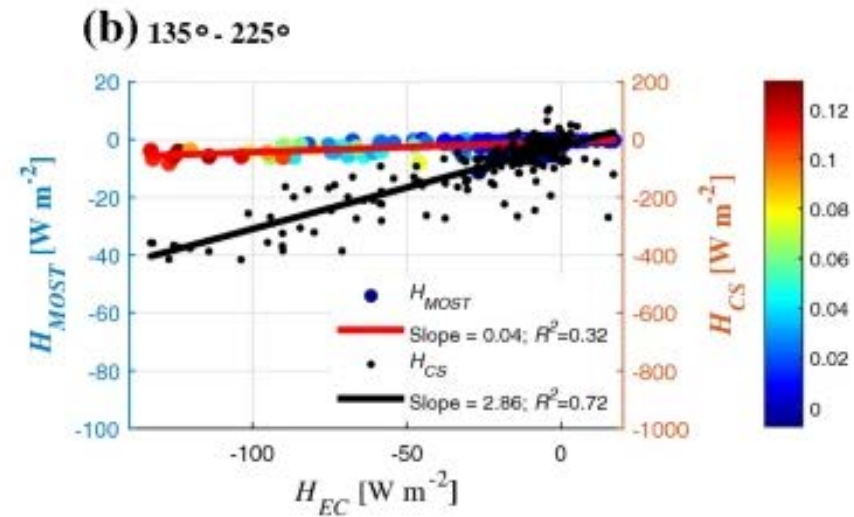
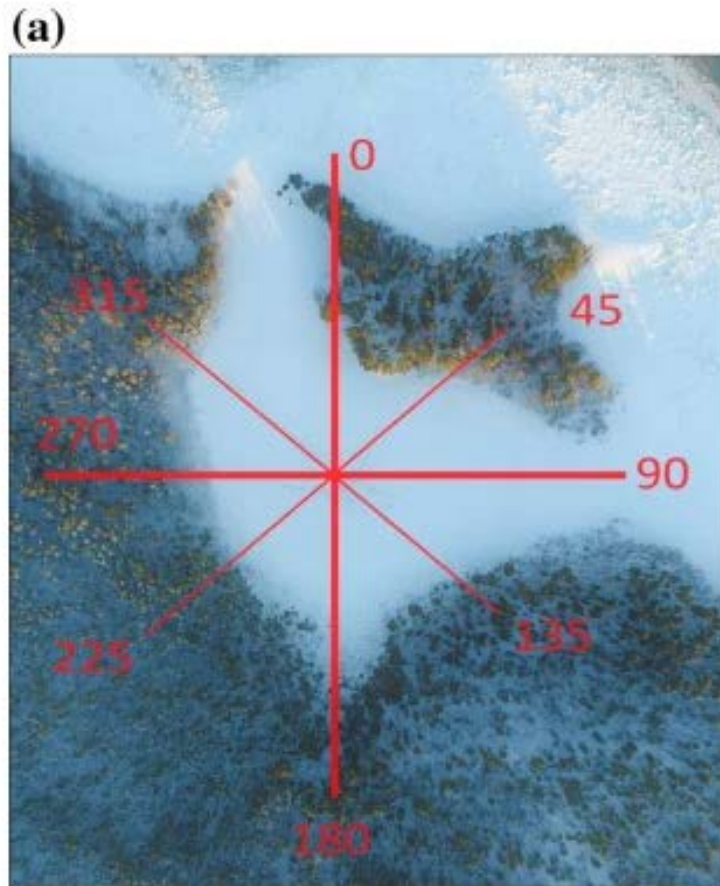


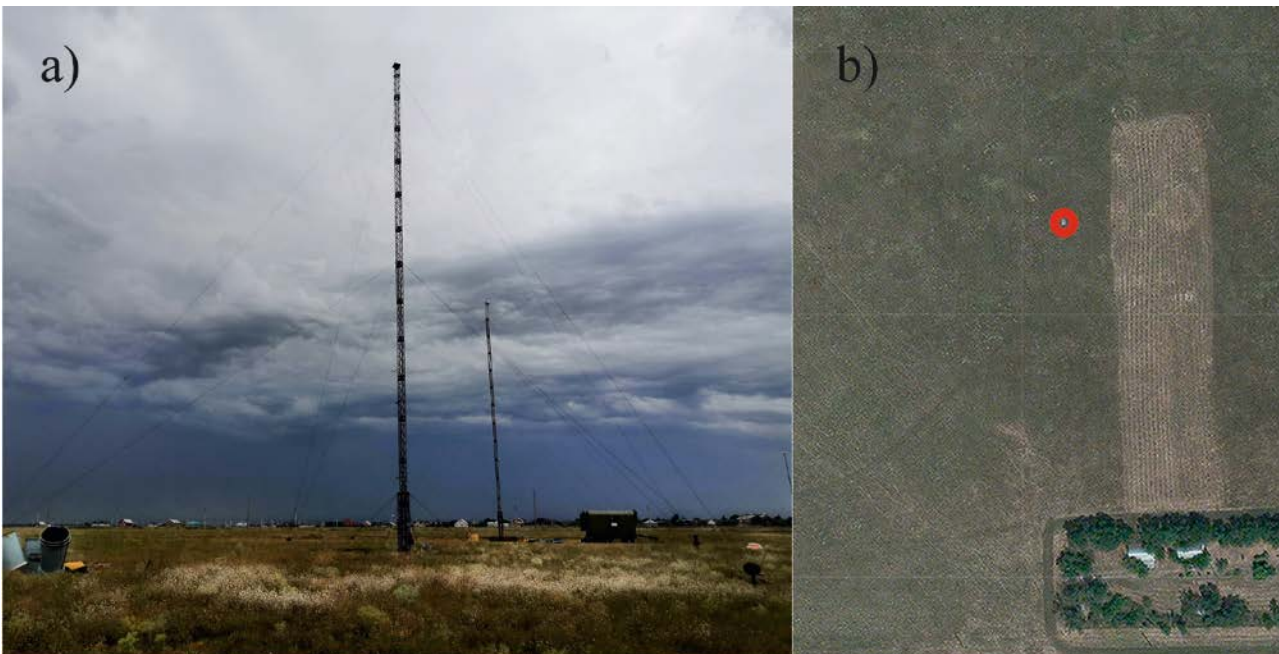
Наибольшее расхождение измеренного потока тепла с рассчитанным по ТПМО наблюдается при наличии градиента температуры в потоке над ландшафтом (~100 м)

Barskov K. et al. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest //Boundary-Layer Meteorology. – 2019. – Т. 173. – С. 311-320.

$$H_{CS} = -C_p \rho \overline{w' T'} = -C_P \rho \frac{\overline{w' w' T'}}{S_w (w'^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Вклад в поток тепла когерентных структур

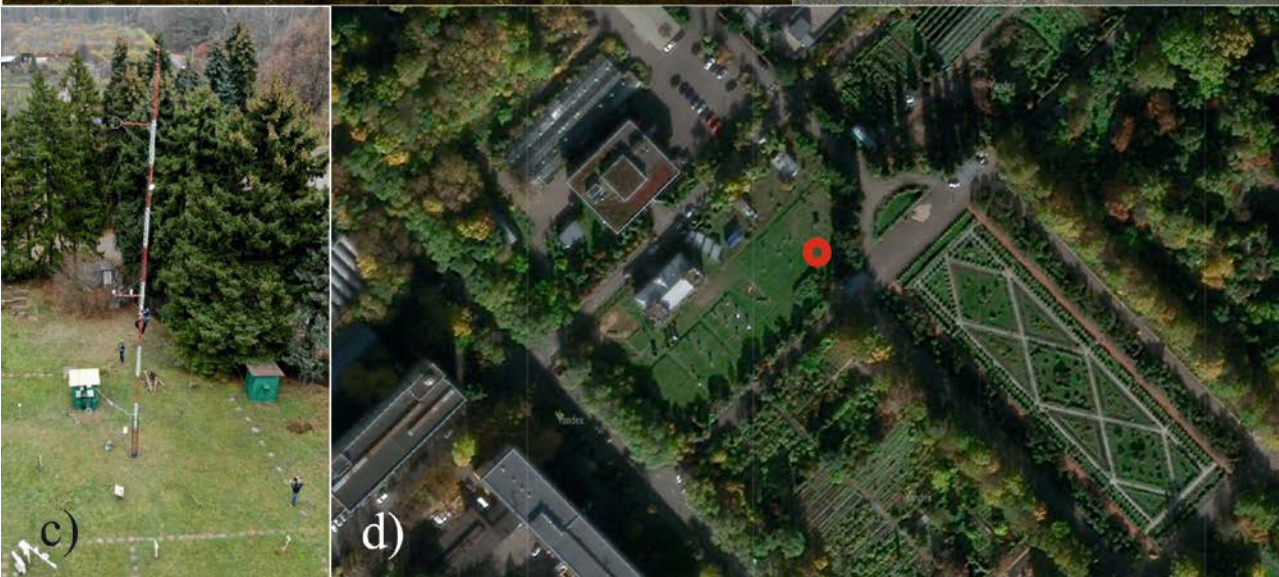




Цимлянск

6.08.2020-14.08.2020 и 4.08.2021-15.08.2021.

Измерения пульсаций трех компонент скорости ветра и температуры, 20 Гц, WindMaster 3D (Gill Instruments, UK) на уровнях 2 м, 10 м и 30 м.



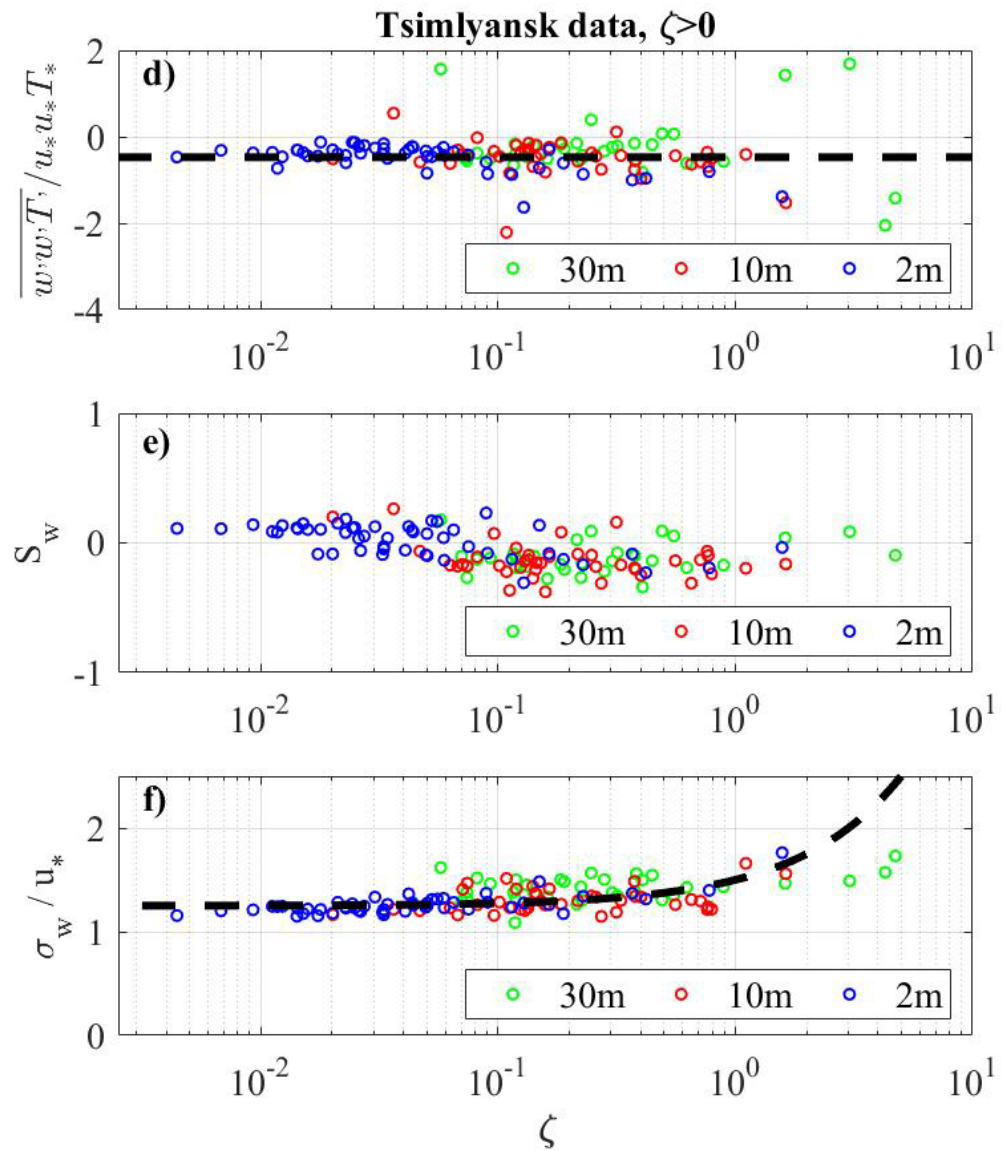
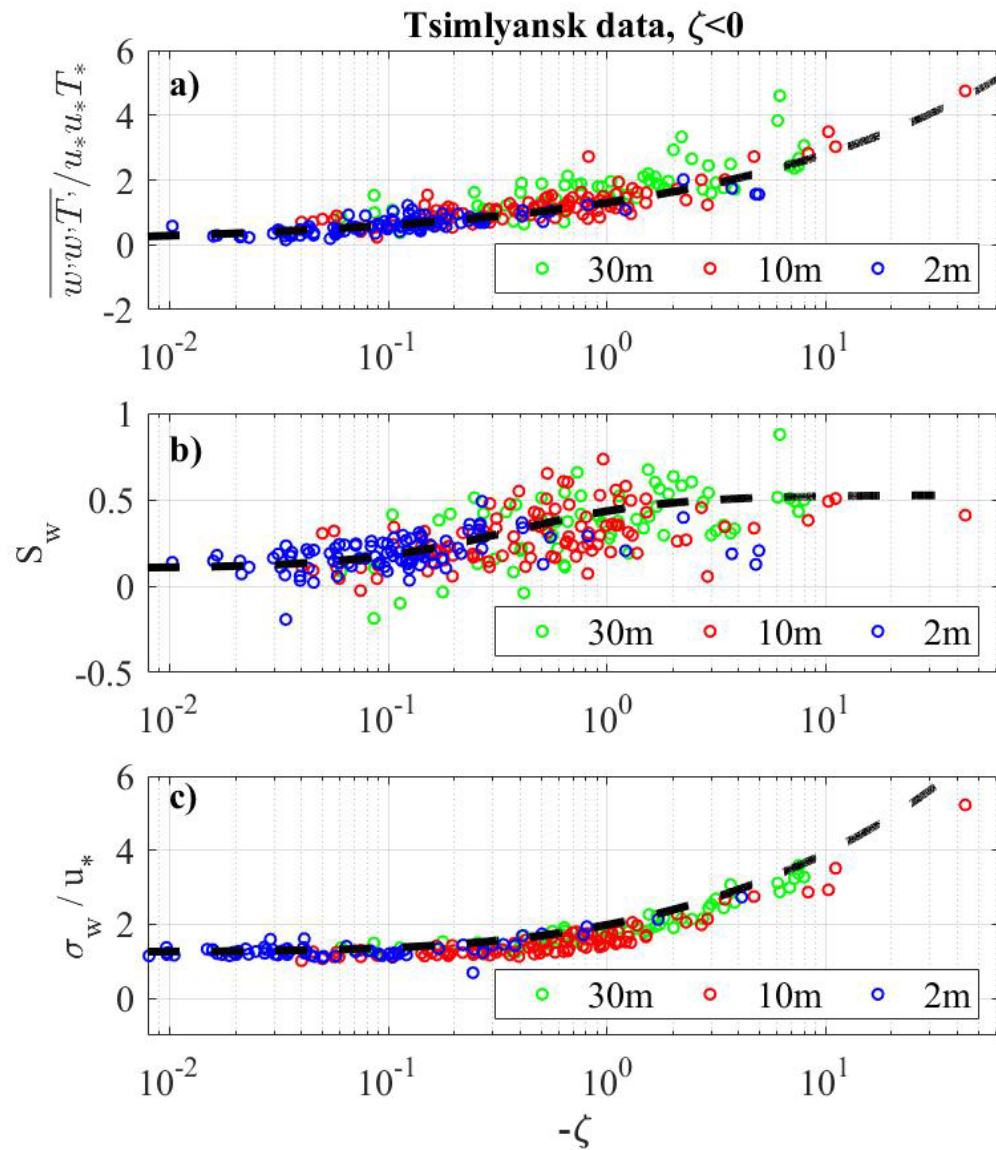
Мачта МГУ

Ноябрь 2019-май 2020

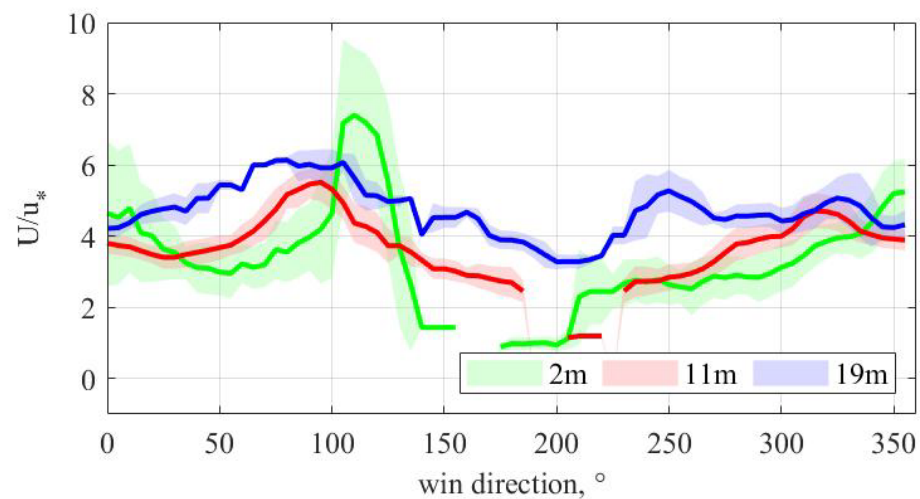
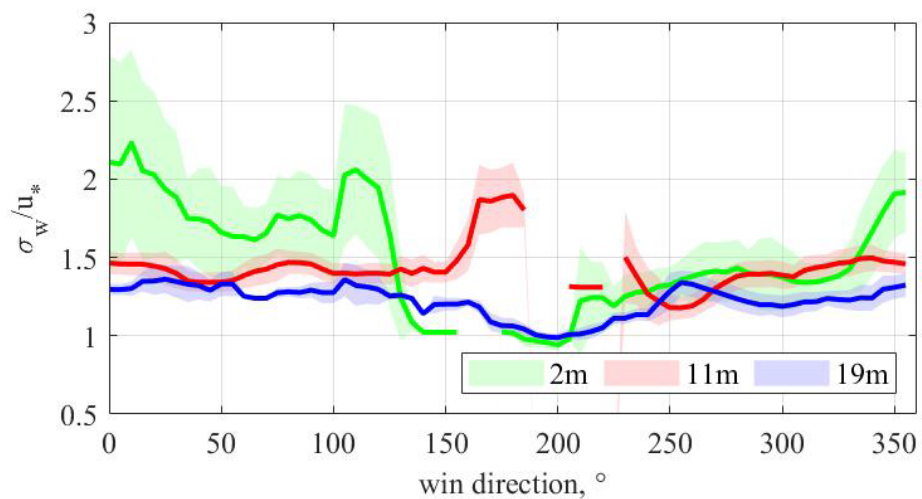
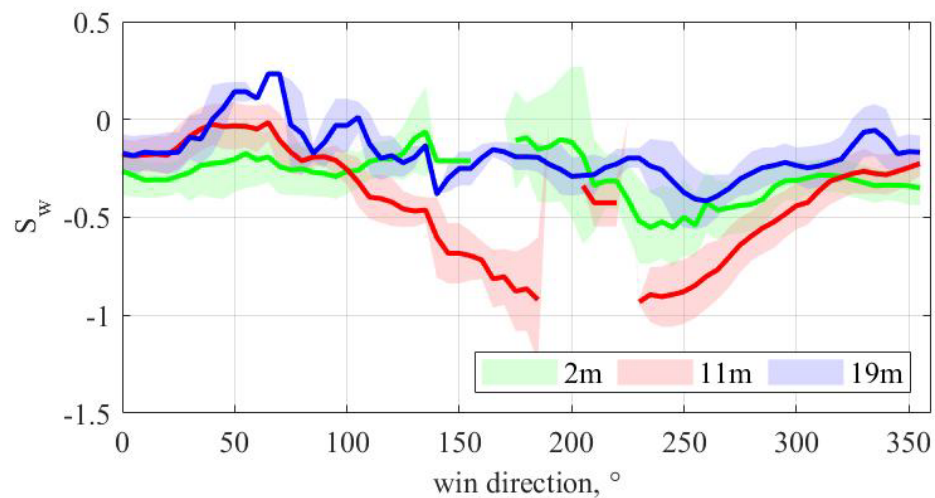
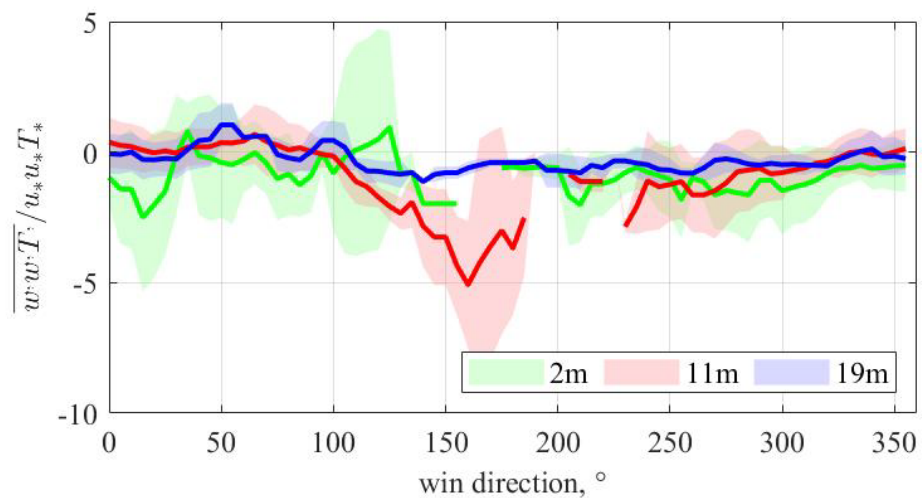
Измерения пульсаций трех компонент скорости ветра и температуры, 20 Гц, Metek uSonic-3 Scientific на уровнях 2 м, 11 м и 19 м.

Barskov K.V., Chechin D.G., Drozd I.D., Artamonov A.Yu., Pashkin A.D., Gavrikov A.V., Varensov M.I., Stepanenko V.M., Repina I.A. Relationships Between Second and Third Moments in the Surface Layer Under Different Stratification over Grassland and Urban Landscapes Boundary-Layer Meteorology (2022 г.) <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00751-4>

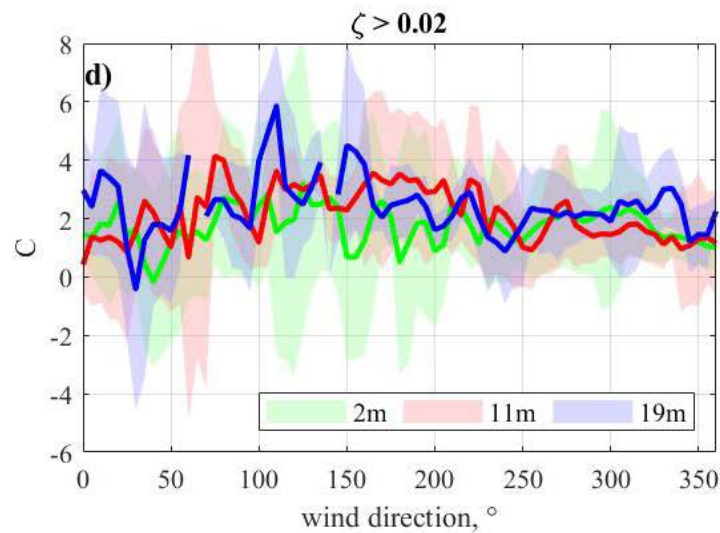
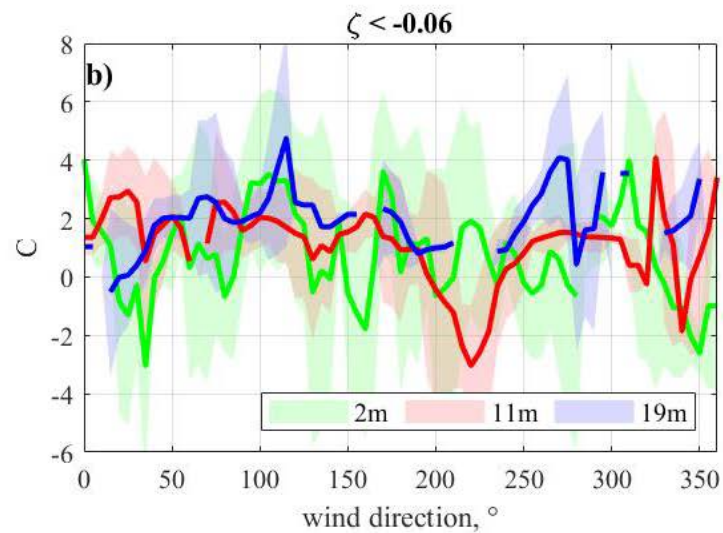
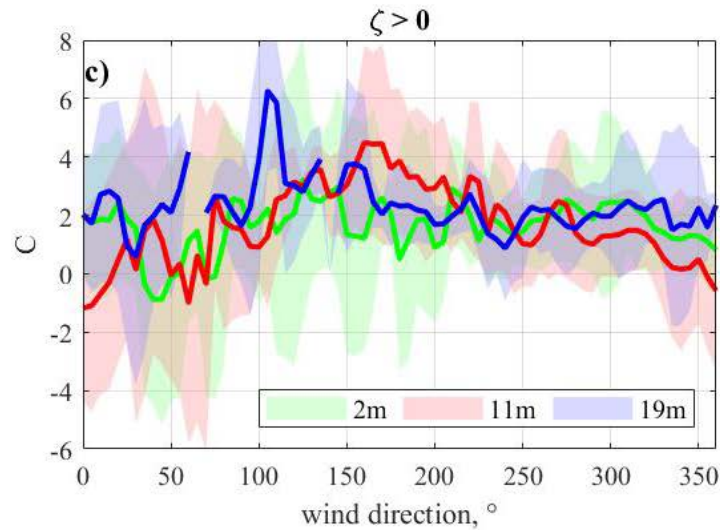
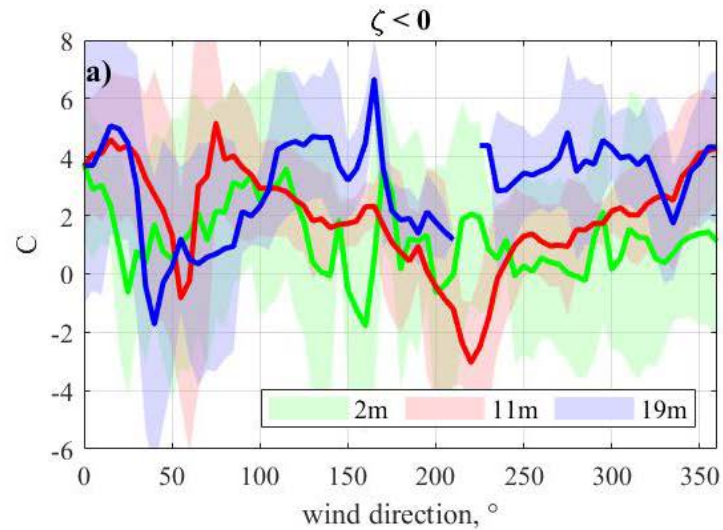
Результаты над Цимлянском



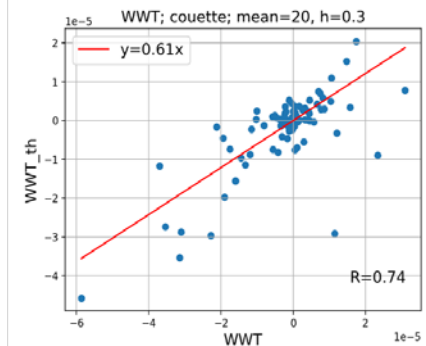
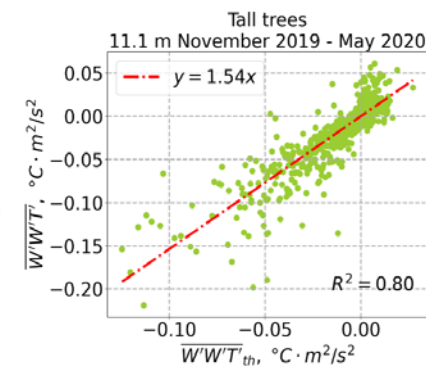
Мачта МГУ: зависимость от направления при нейтральной стратификации



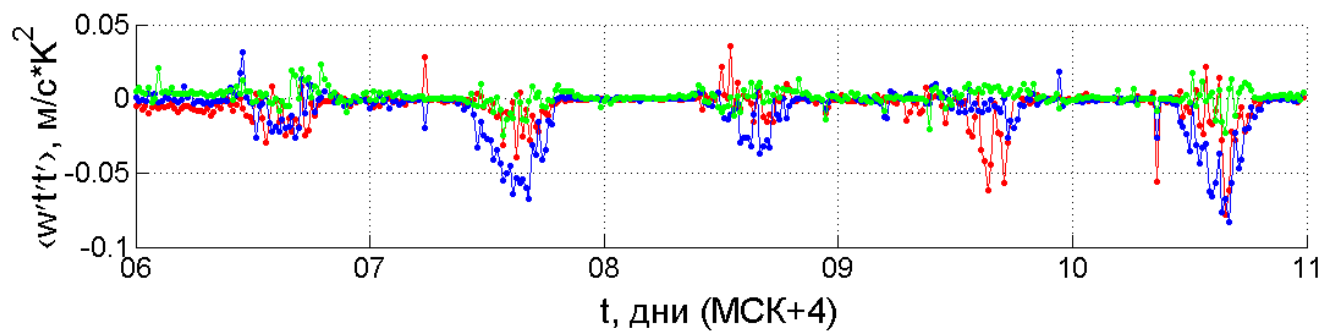
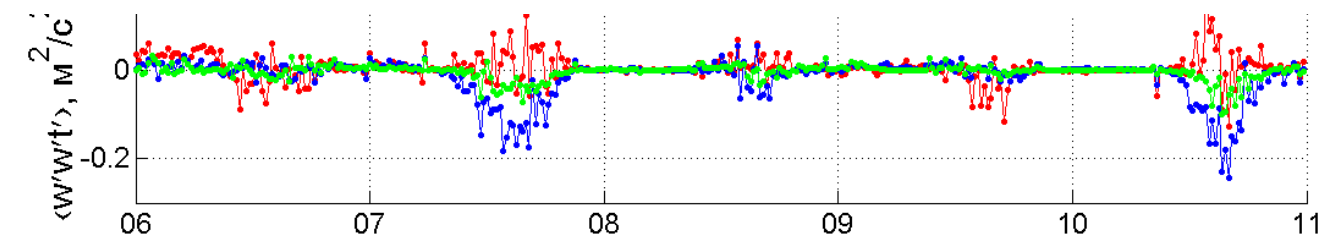
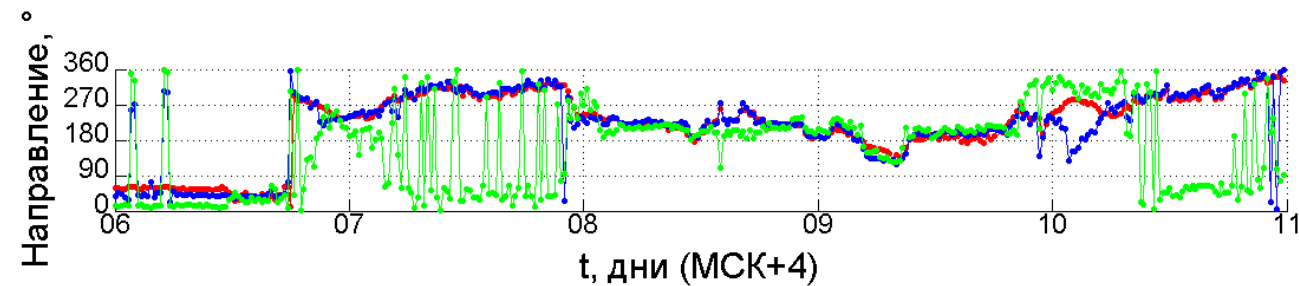
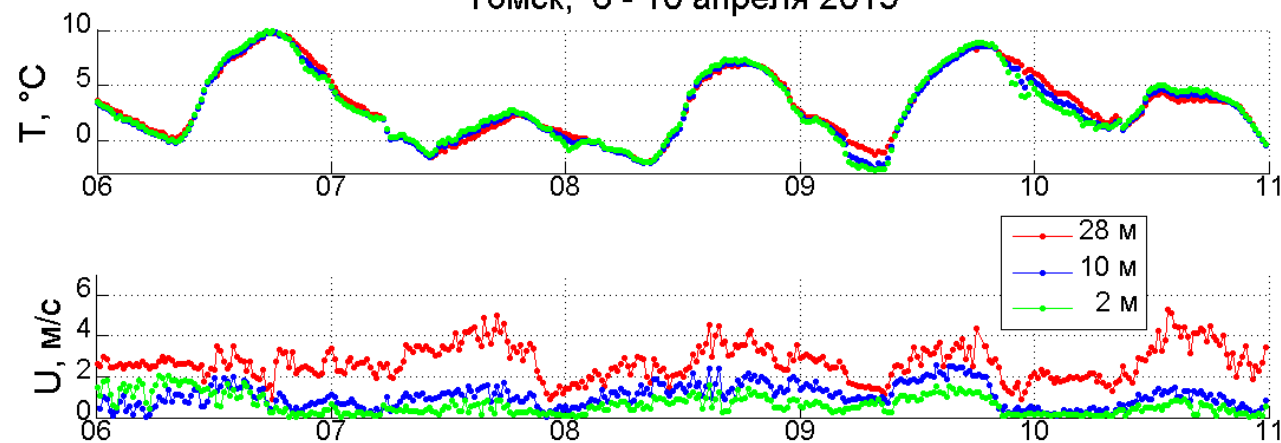
Мачта МГУ: константа С для разных направлений



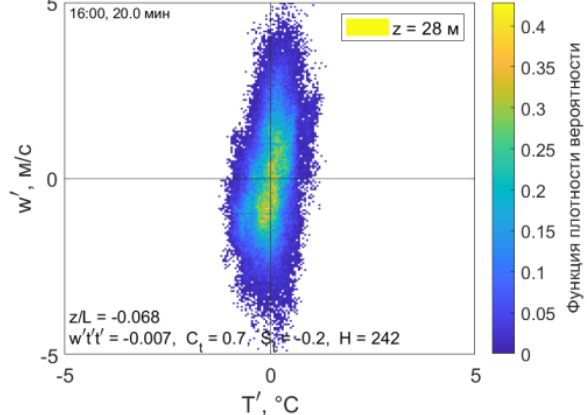
$$\overline{w'w'c'} = C_T S_w (\overline{w'w'})^{1/2} \overline{w'c'},$$



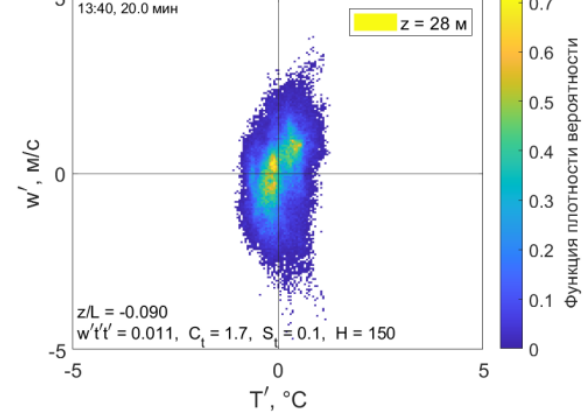
Томск, 6 - 10 апреля 2019



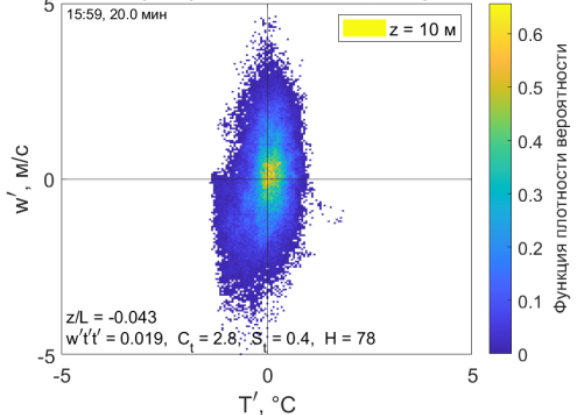
Совместное распределение. Томск, 7 апреля 2019



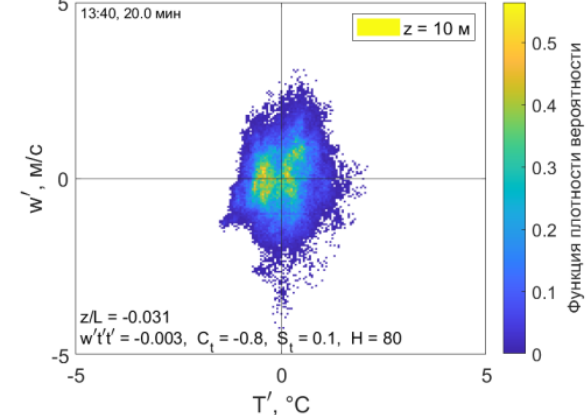
Совместное распределение. Томск, 8 апреля 2019



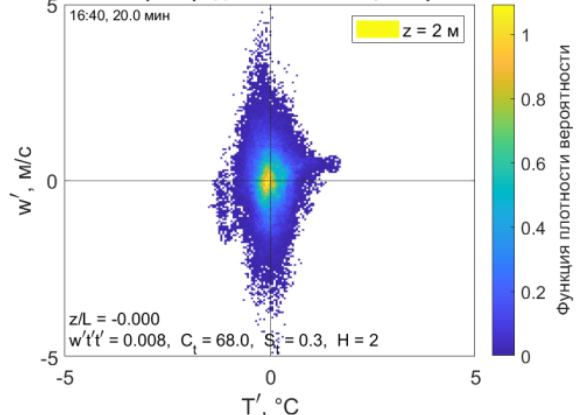
Совместное распределение. Томск, 7 апреля 2019



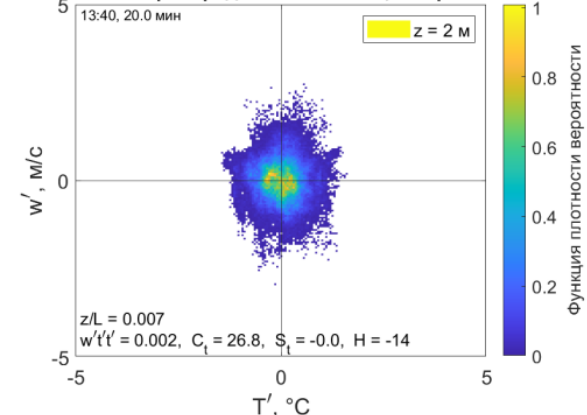
Совместное распределение. Томск, 8 апреля 2019



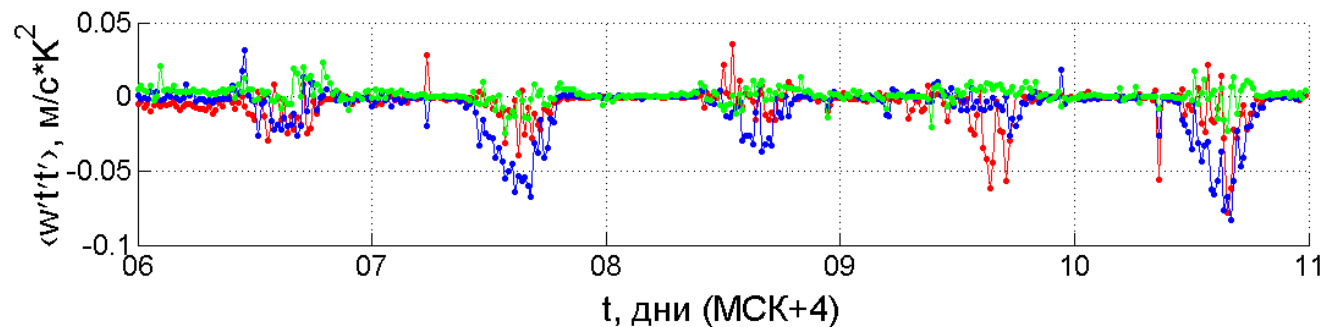
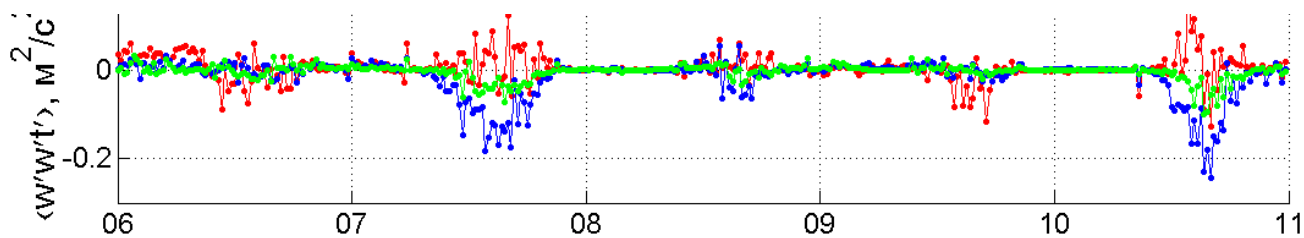
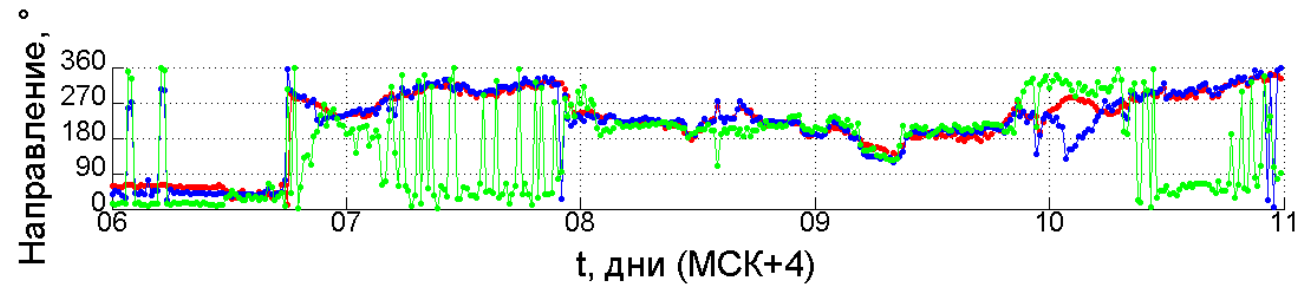
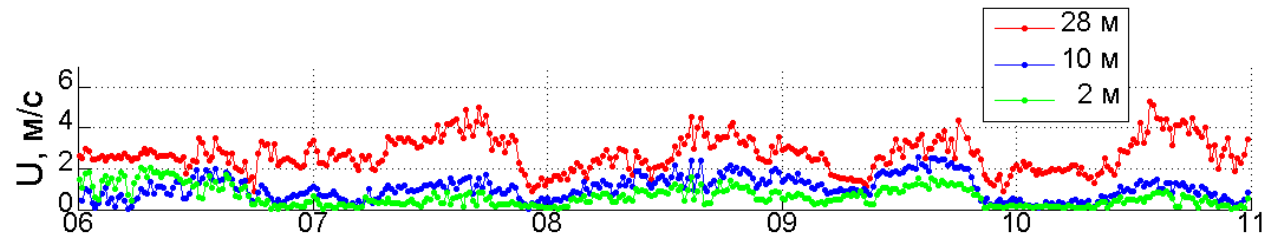
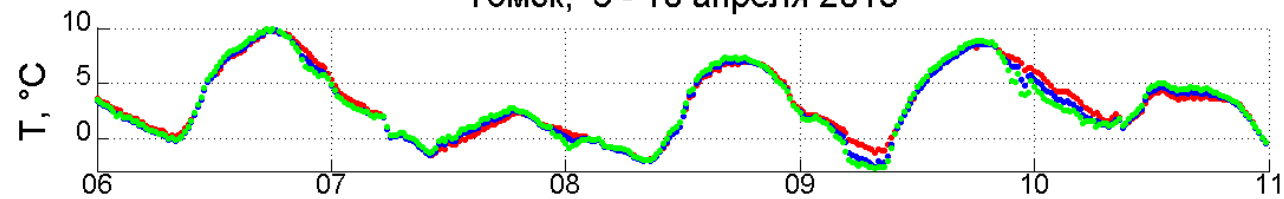
Совместное распределение. Томск, 7 апреля 2019



Совместное распределение. Томск, 8 апреля 2019



Томск, 6 - 10 апреля 2019

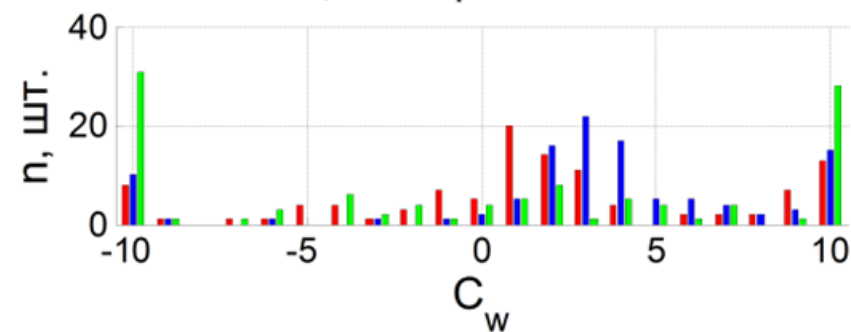


Распределение безразмерного коэффициента пропорциональности C_w

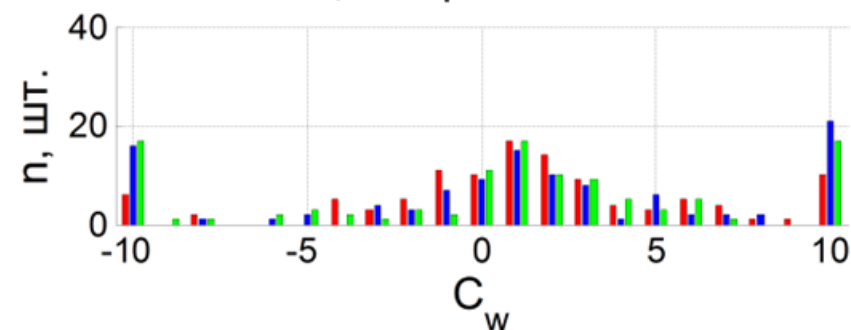
а) Режим, когда есть поворот ветра на уровне 2 м

б) Режим, когда нет поворота ветра на уровне 2 м

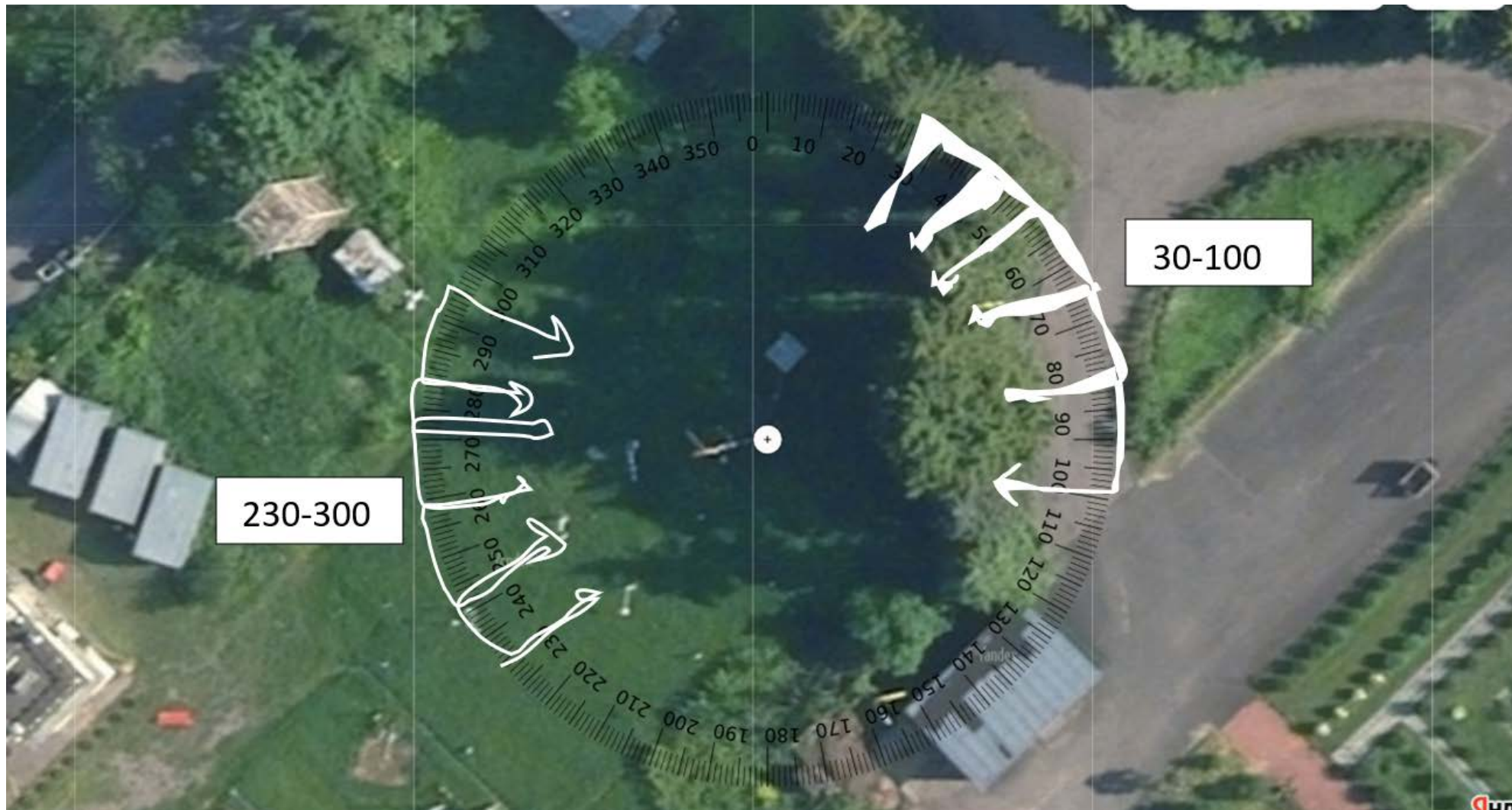
7, 10 апреля 2019



8, 9 апреля 2019



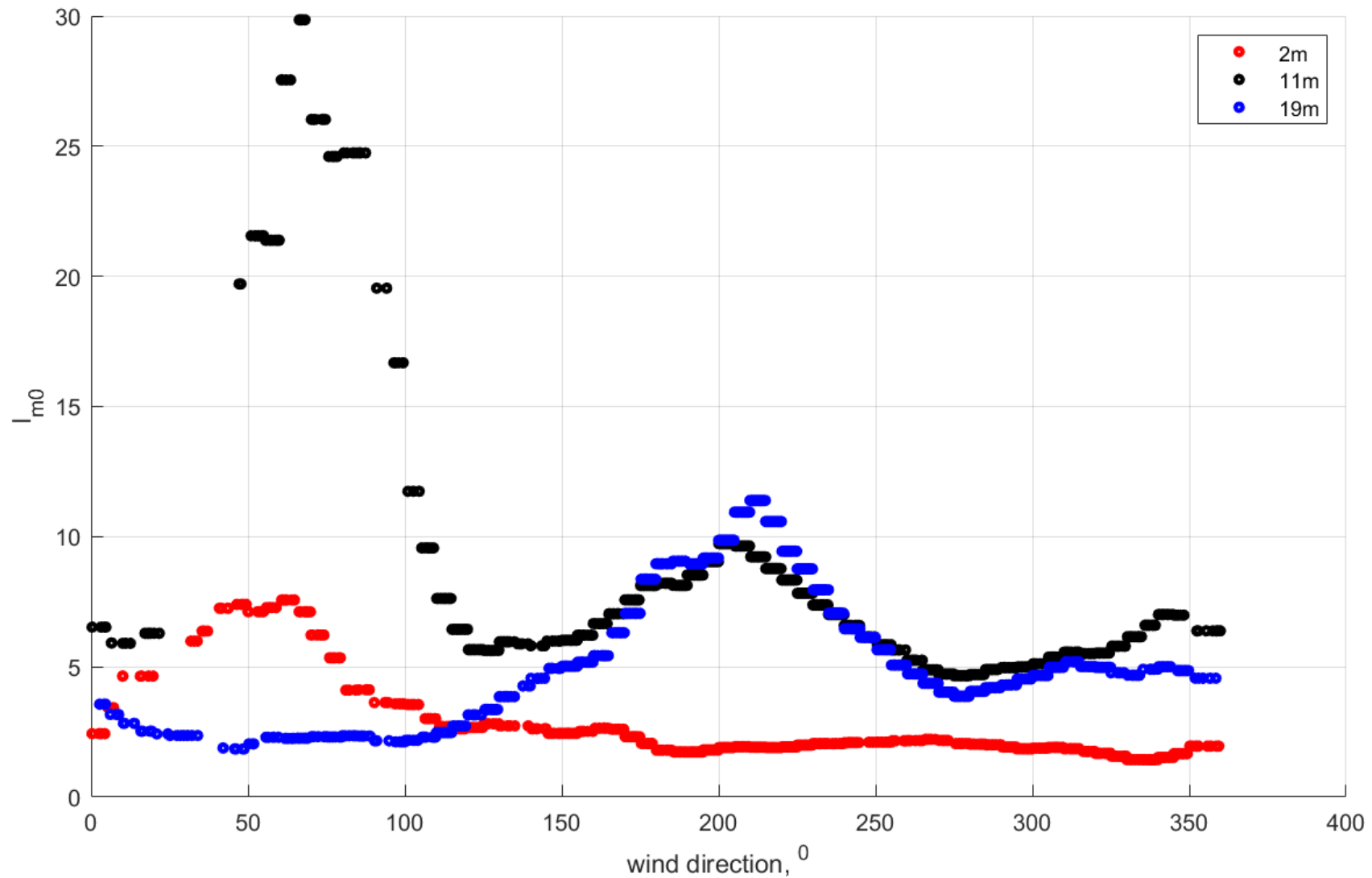
Масштабы турбулентности над неоднородным ландшафтом



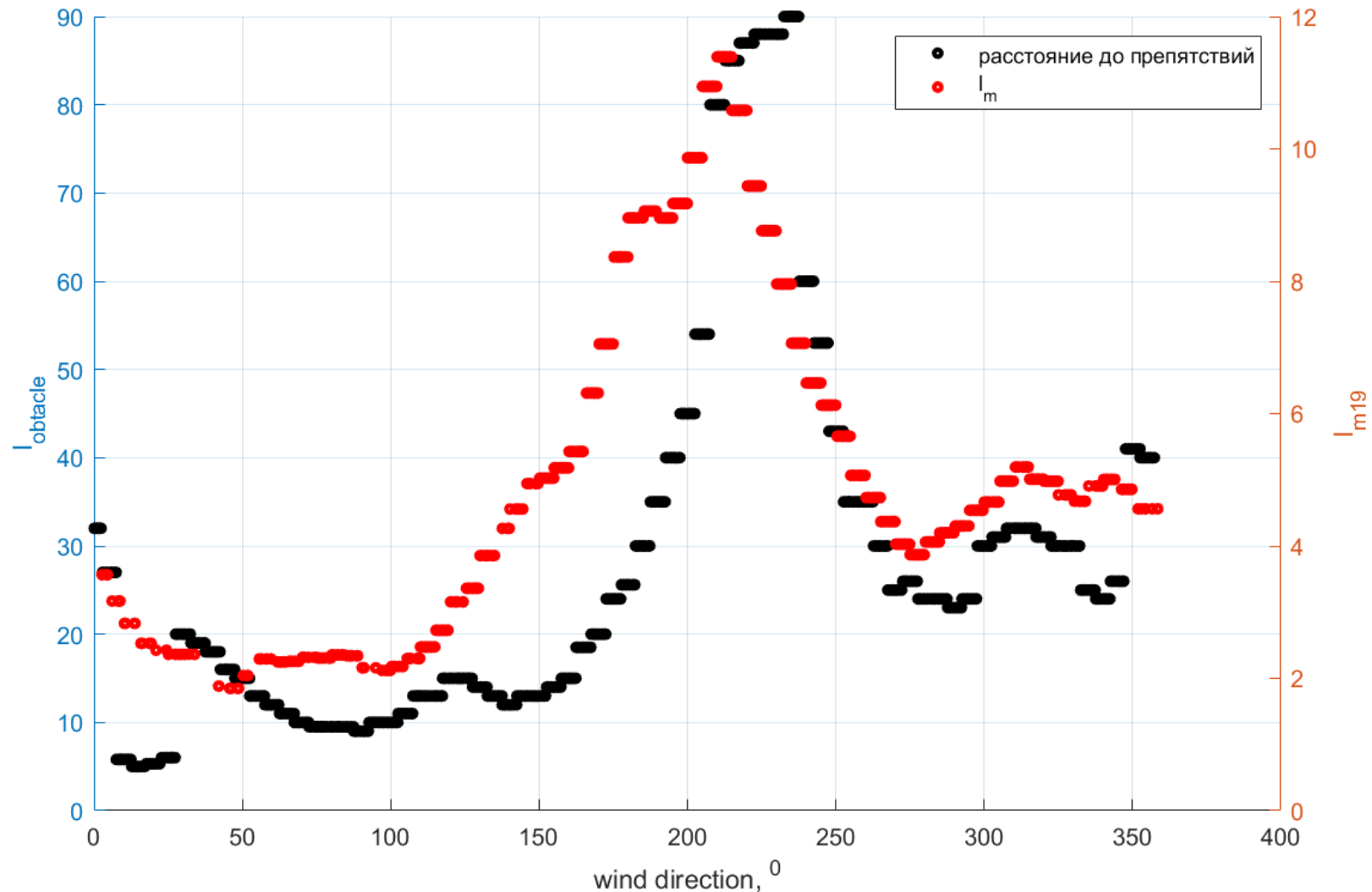
$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2$$

Путь смешения Прандтля

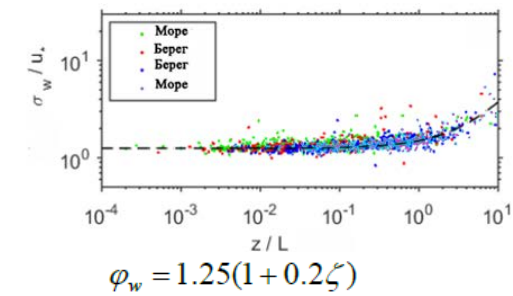
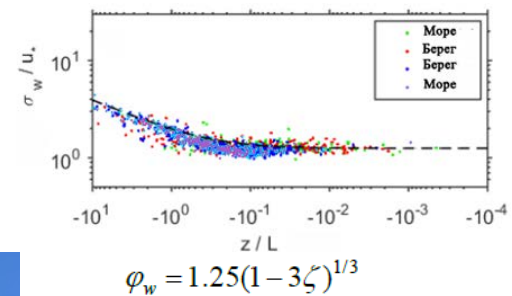
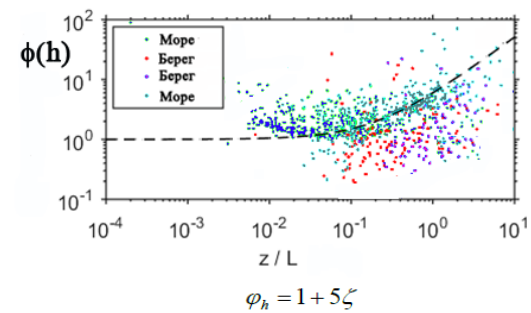
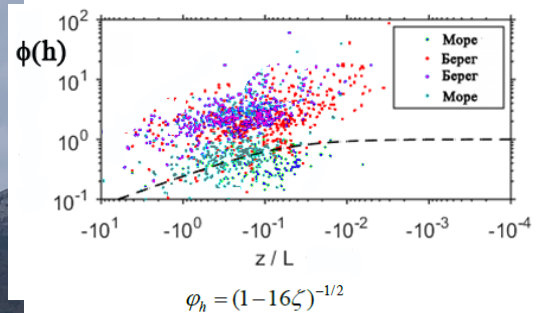
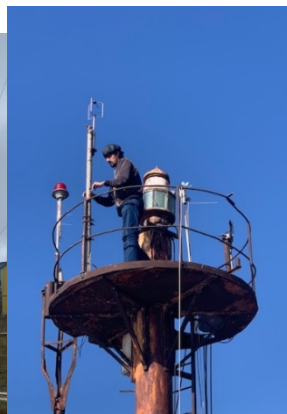
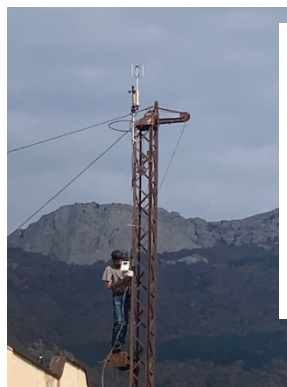
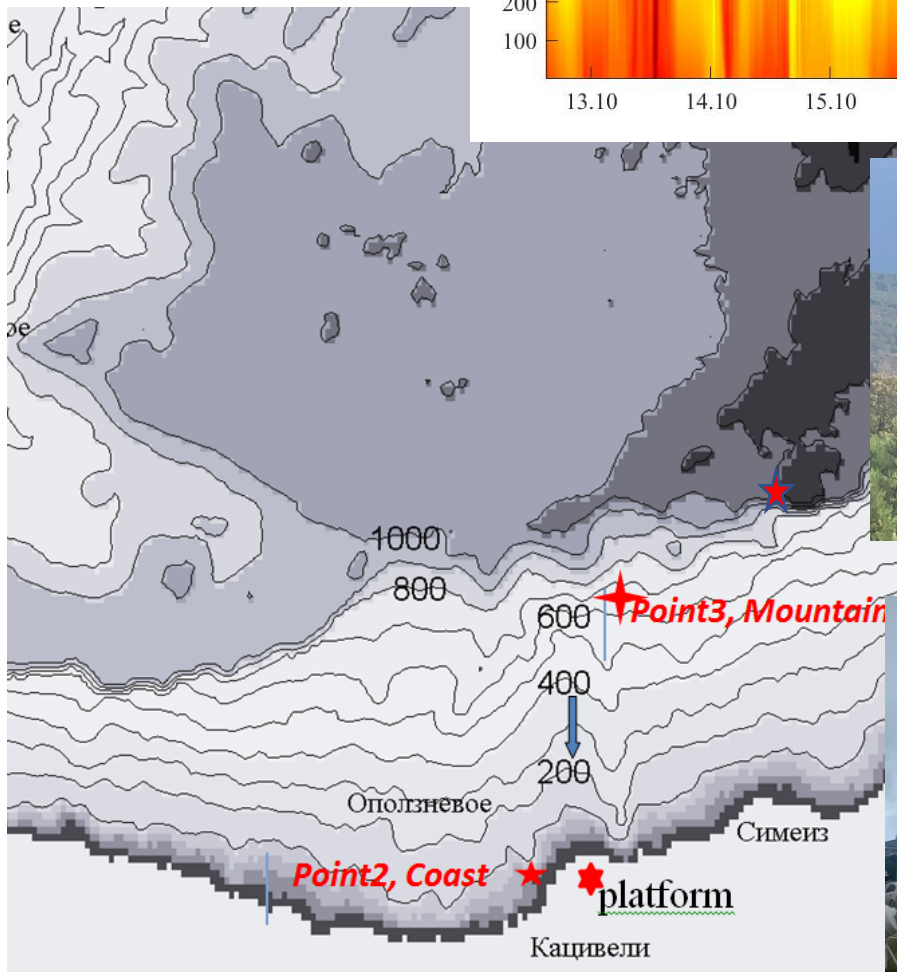
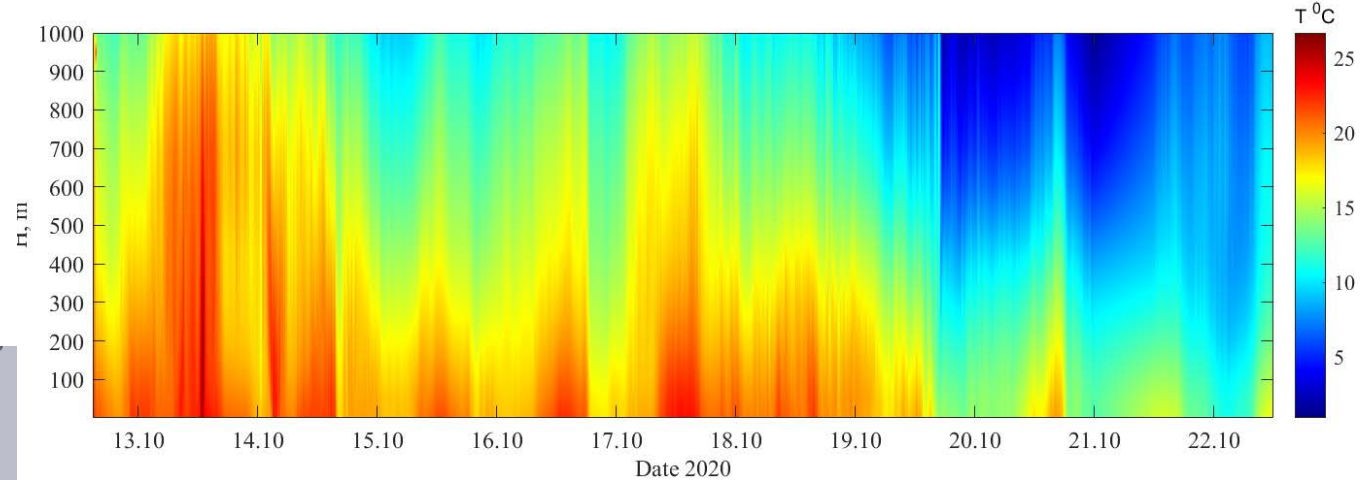
$l = \kappa Z$ - Масштаб турбулентности или длина пути перемешивания



Согласованность пути смещения и расстояния до препятствий

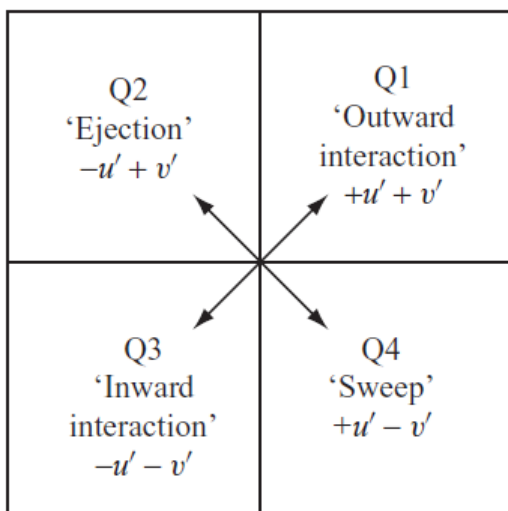


Октябрь 2020



Напряжение Рейнольдса $\overline{u'w'}$ показывает только осредненное значение. Для оценки вклада в эту величину различных кратковременных событий проводится квадрантный анализ: в зависимости от знака u' и w' каждое измерение попадает в один из квадрантов, обозначенных на рисунке

quadrant 1: $u' > 0, w' > 0$ outward interaction
 quadrant 2: $u' < 0, w' > 0$ burst or ejection
 quadrant 3: $u' < 0, w' < 0$ inward interaction
 quadrant 4: $u' > 0, w' < 0$ sweep or gust.



Вклад i -го квадранта в общее значение $u'w'$ при данном параметре H считается по формуле

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) w'(t) I_{i,H}[u'(t), w'(t)] dt$$

$$I_{i,H}(u', w') = \begin{cases} 1, & \text{if } (u', w') \text{ is in quadrant } i \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

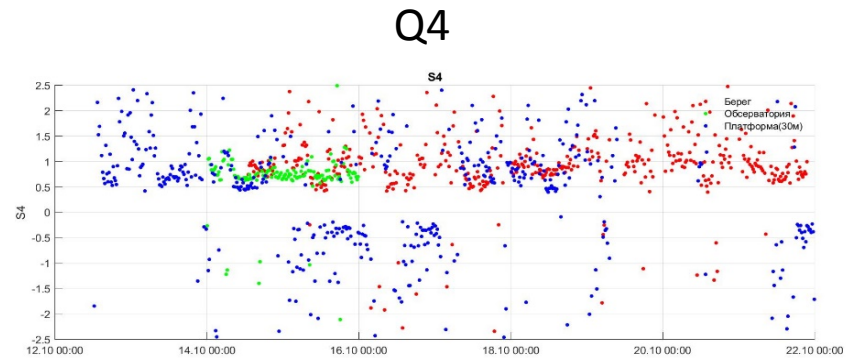
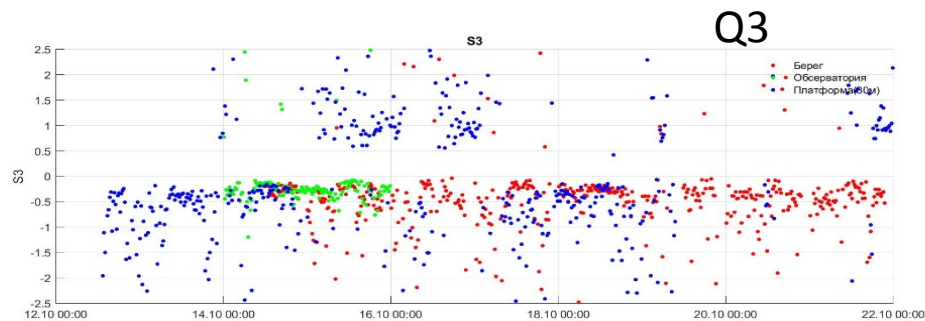
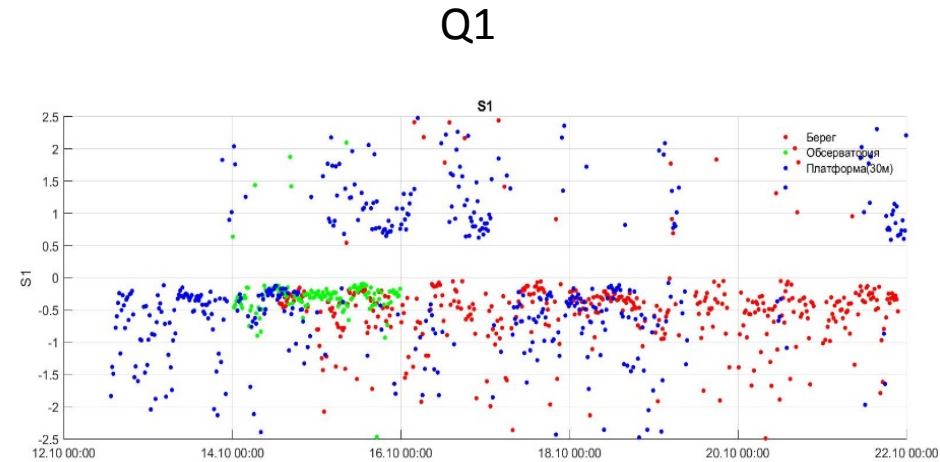
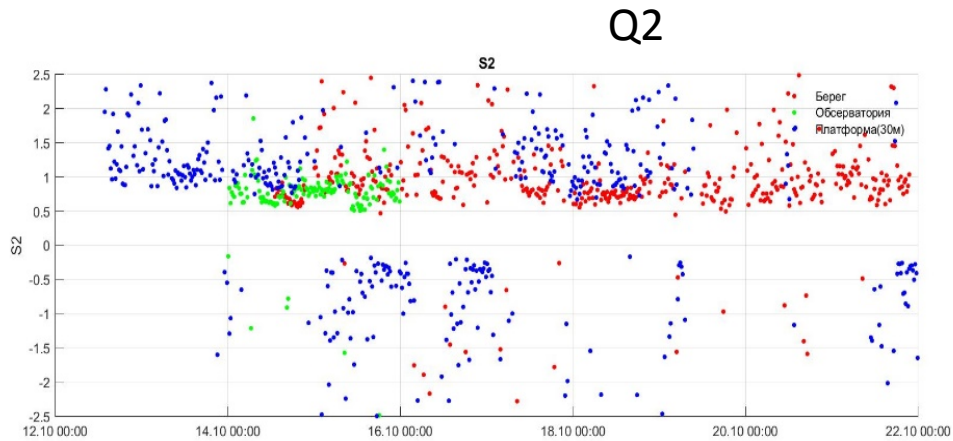
В нашем случае формула в таком виде:

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u' v' I_{i,H}$$

Относительный вклад i -го квадранта определяется по формуле:

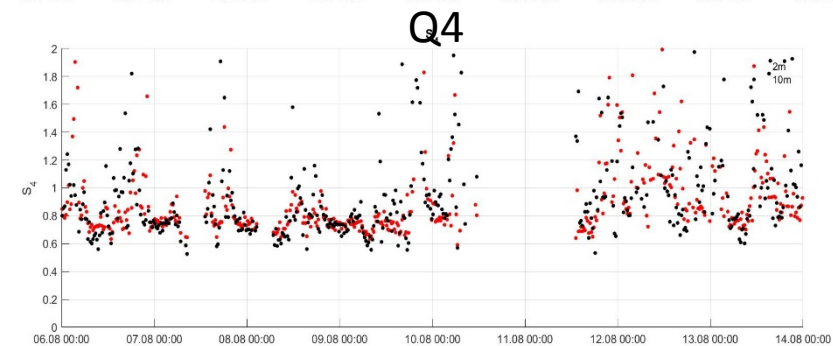
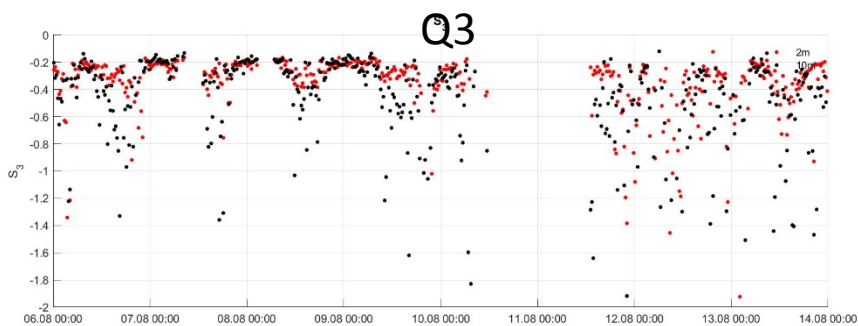
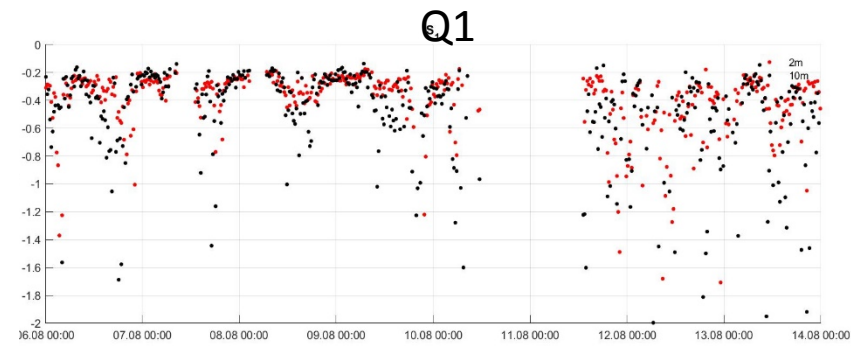
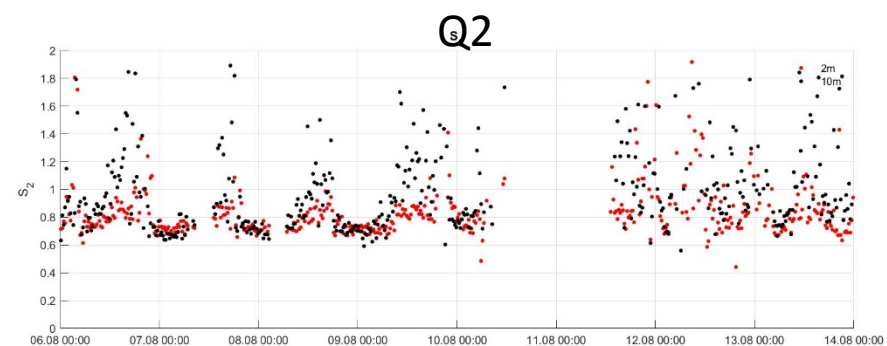
$$S_{i,H} = \langle u'w' \rangle_{i,H} / \overline{u'w'},$$

Вклад квадрантов (Крым 2020)



quadrant 1:	$u' > 0$,	$w' > 0$	outward interaction
quadrant 2:	$u' < 0$,	$w' > 0$	burst or ejection
quadrant 3:	$u' < 0$,	$w' < 0$	inward interaction
quadrant 4:	$u' > 0$,	$w' < 0$	sweep or gust.

Вклад квадрантов (Цимлянск 2020)





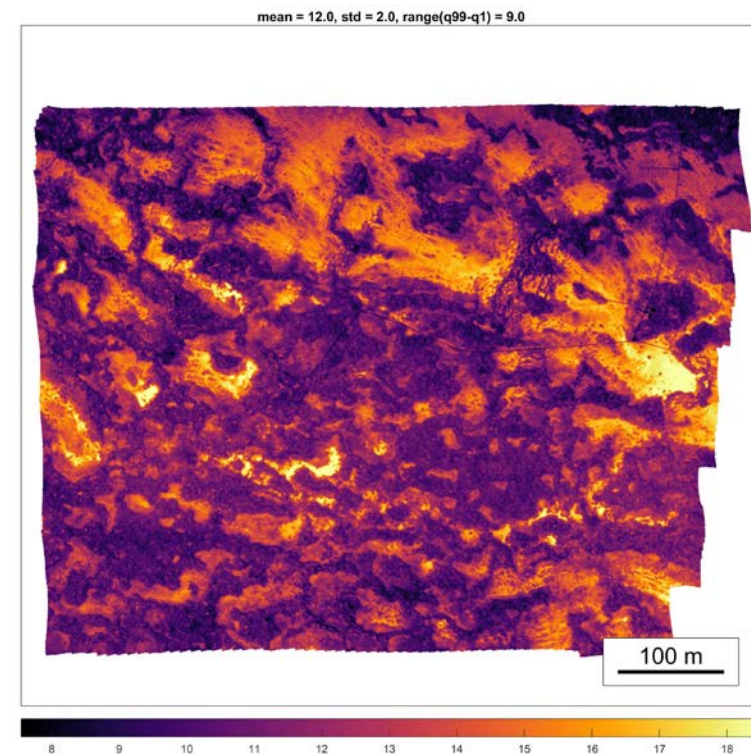
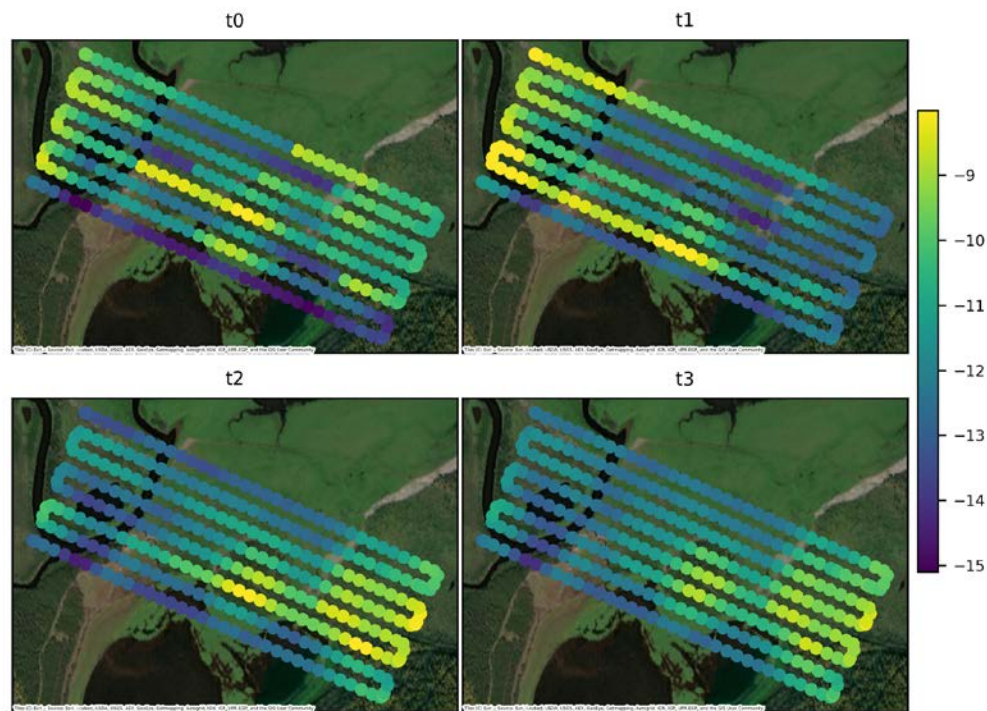
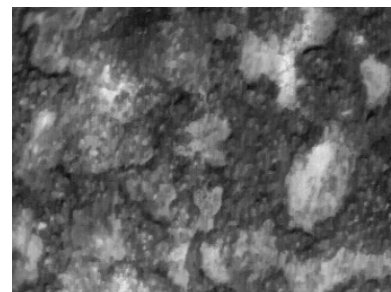
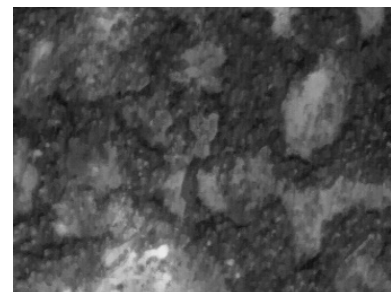
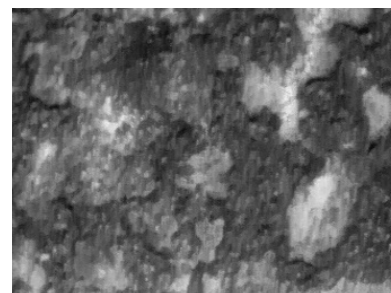
Построение тепловых изображений

Сырые снимки
с камеры

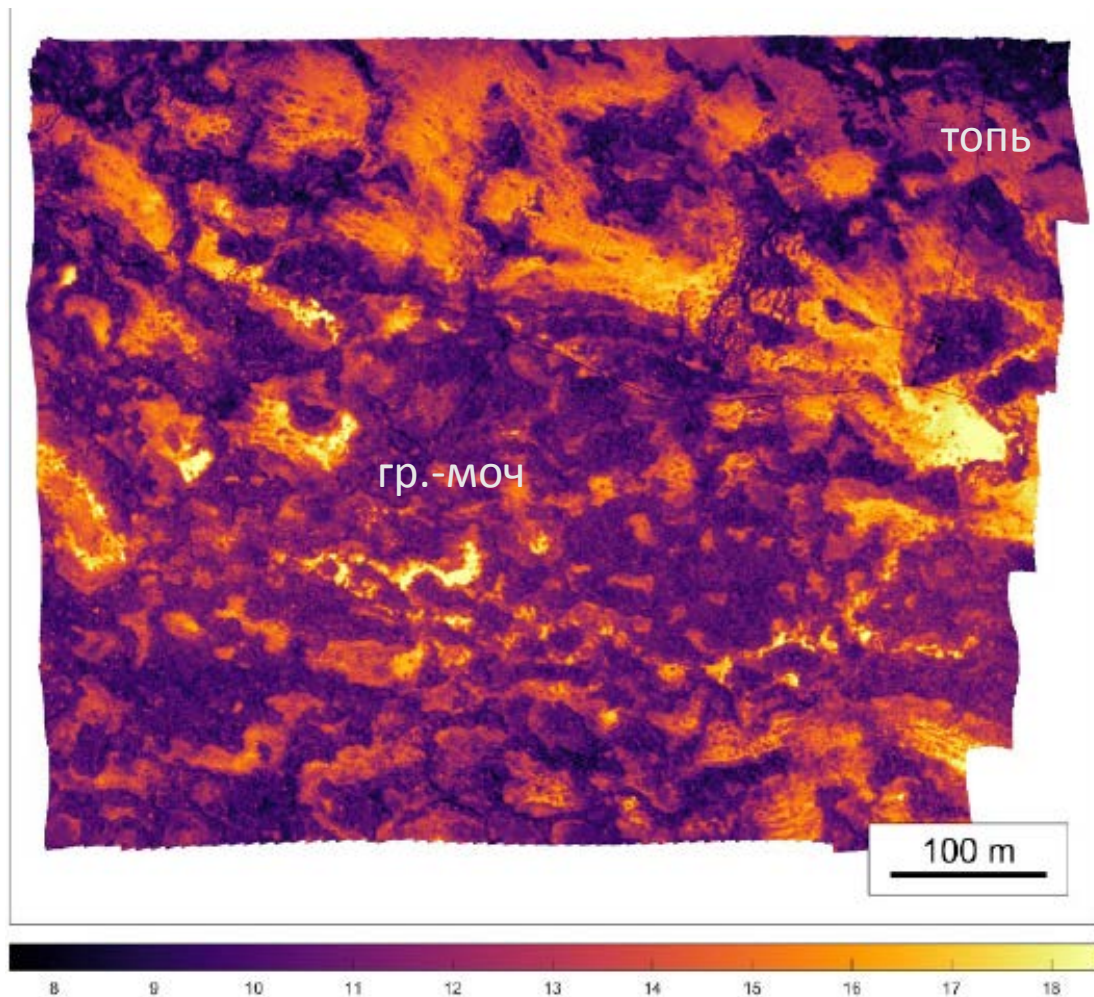
Удаление скачков
температуры между
соседними снимками

Удаление тренда вдоль
сегмента маршрута

Сшивку отдельных
снимков в карту

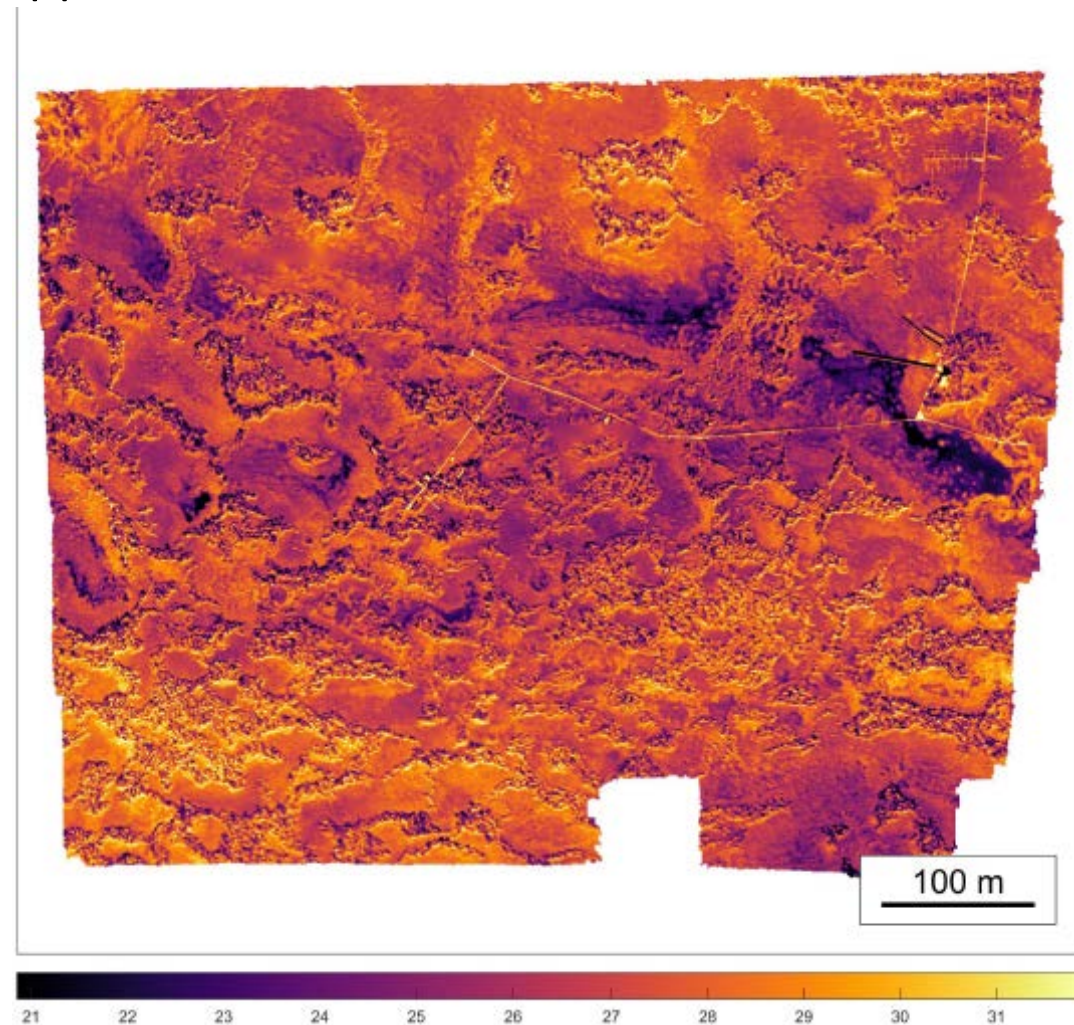


НОЧЬ:

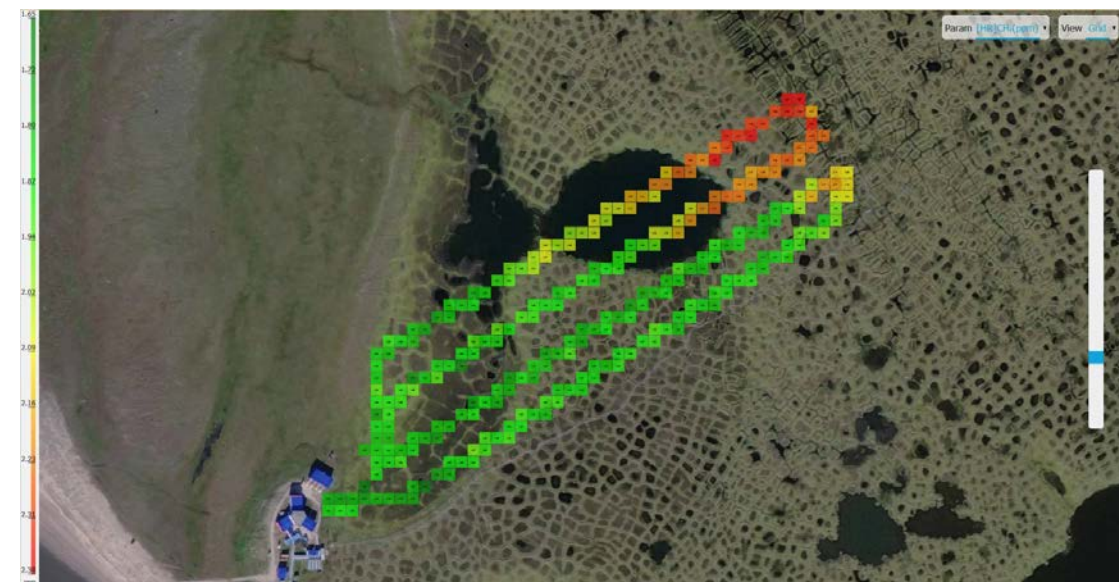


- холодные рям и гряды,
- теплые топи

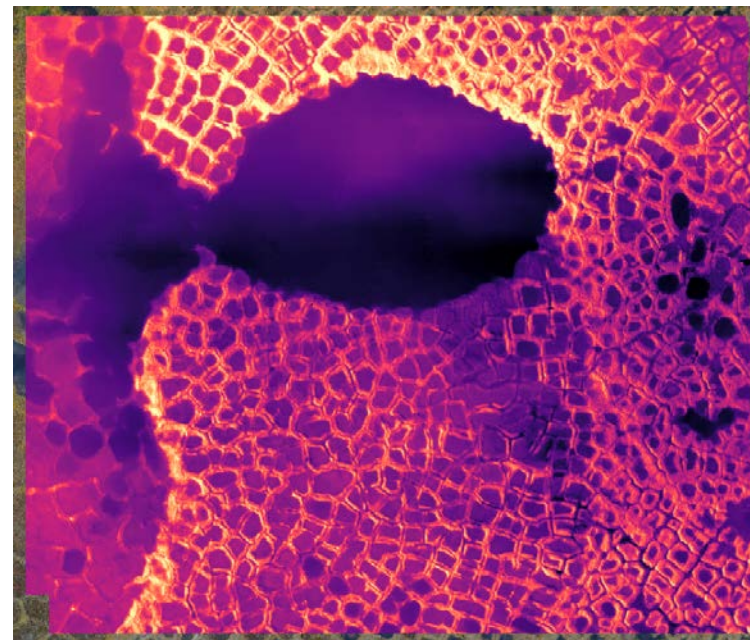
день:



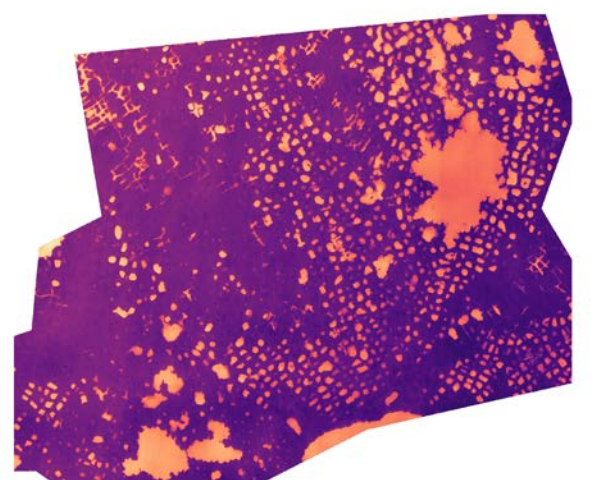
- теплые мочажины/гряды
- холодные топи



00:30 2.8.2024



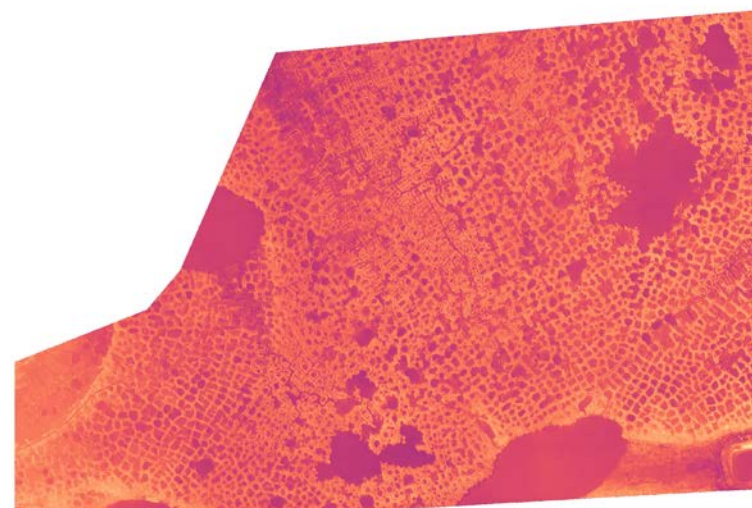
15:30 31.7.2024



Температура
поверхности, °C



0 100 200 300 м



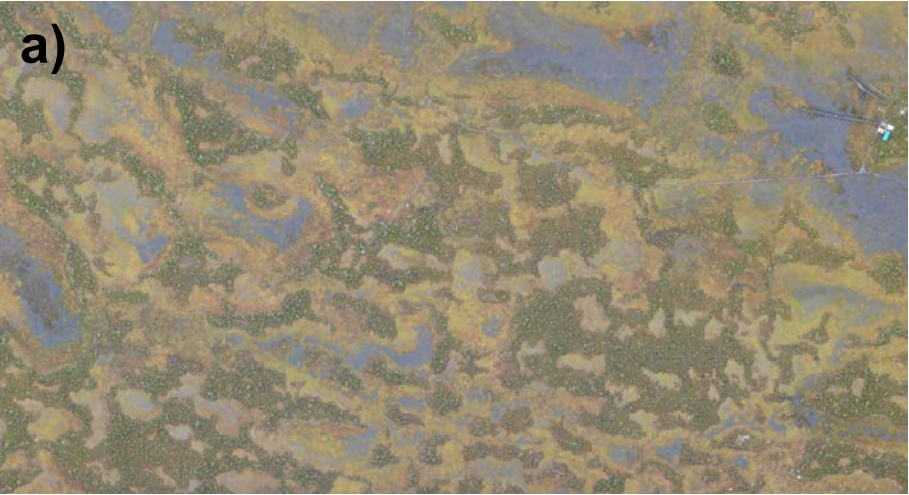
Температура
поверхности, °C



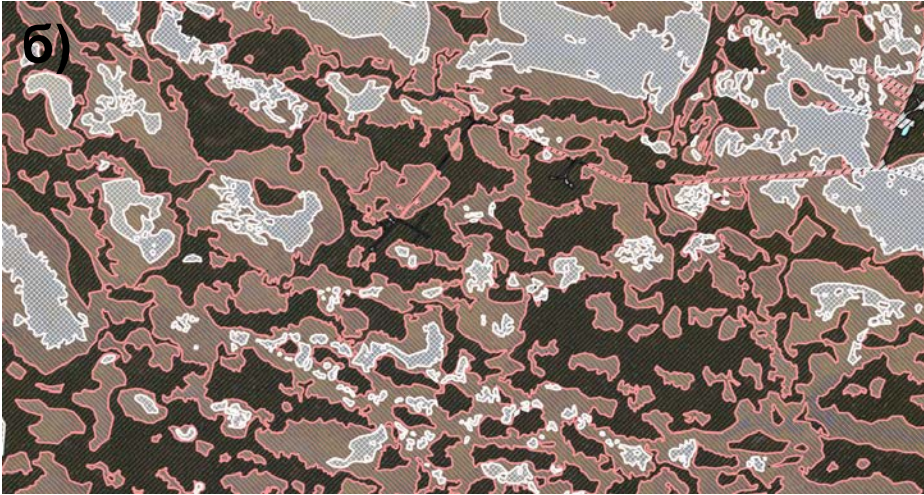
0 100 200 300 м

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



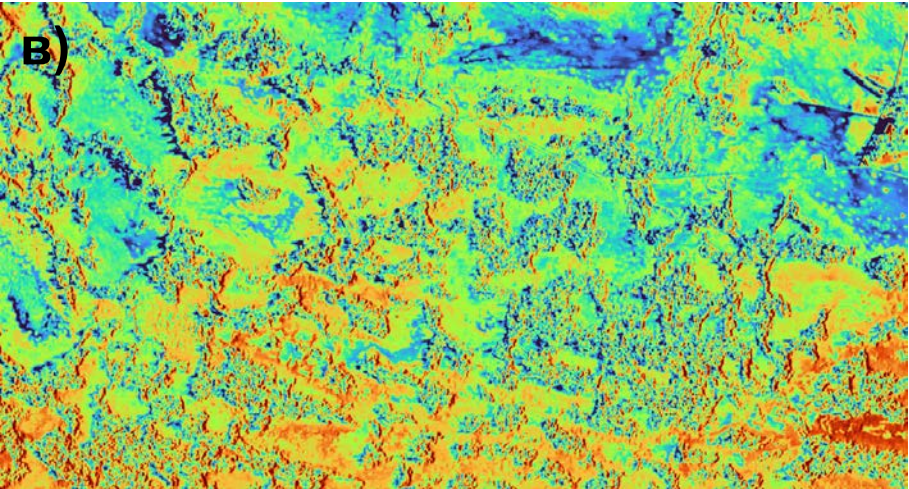
Оцифровка микроландшафтов



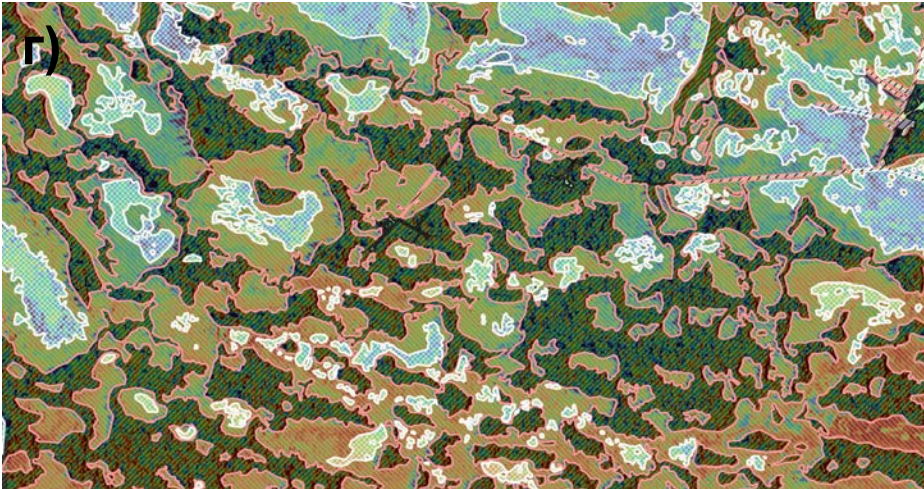
Условные обозначения выделяемых микроландшафтов:

- Рямы
- Мочажины
- Топи
- Мостки

Геопривязка ИК-снимка



Осреднение температур по полигонам



Температура поверхности

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

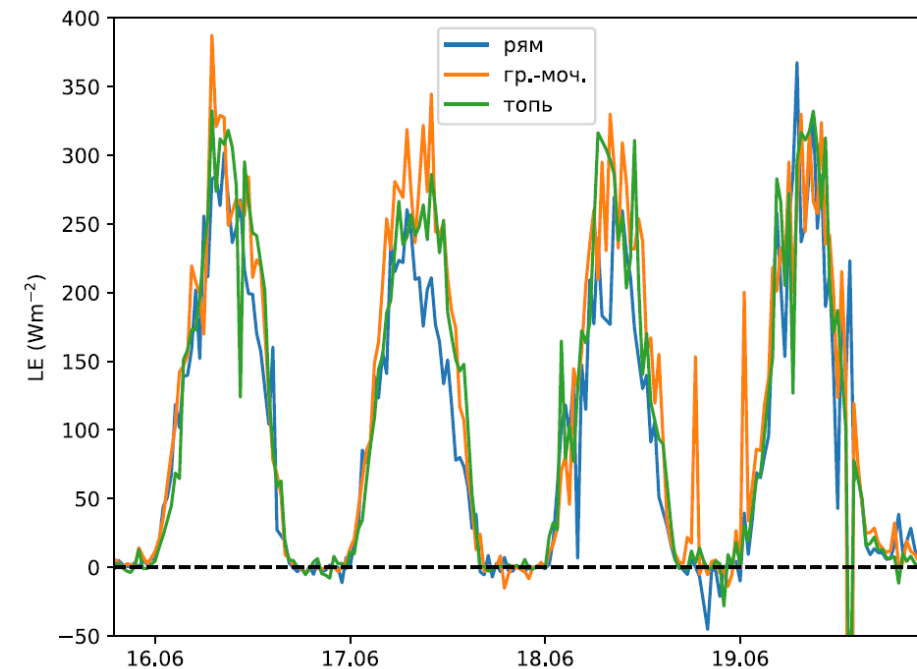
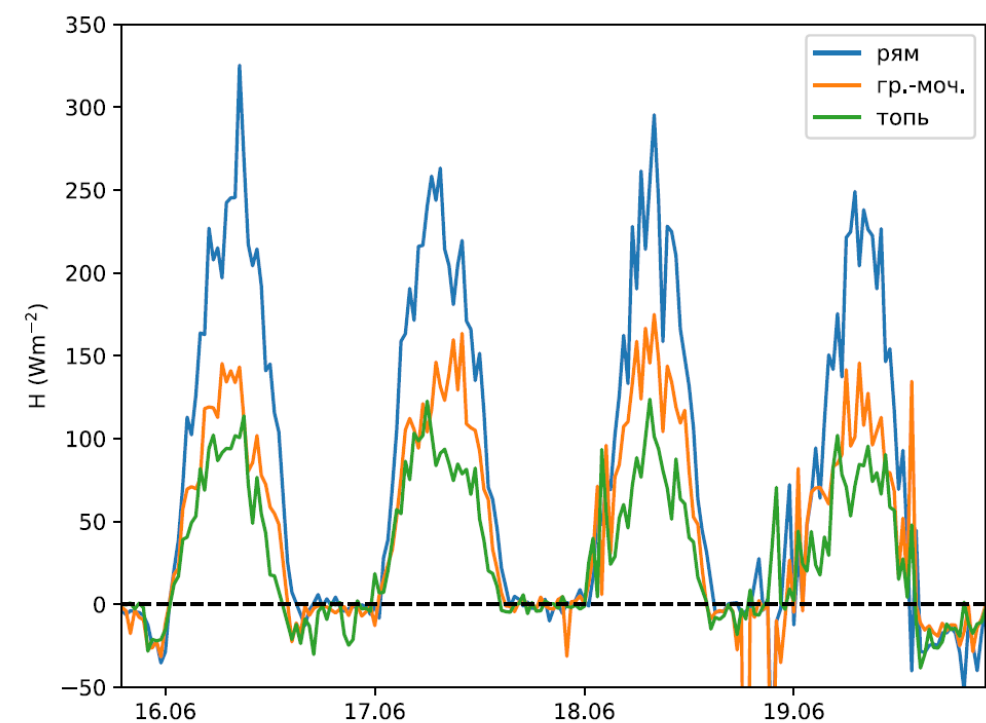
Потоки явного и скрытого тепла (Мухрино)

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

- разность температур,
стратификация, шероховатость?

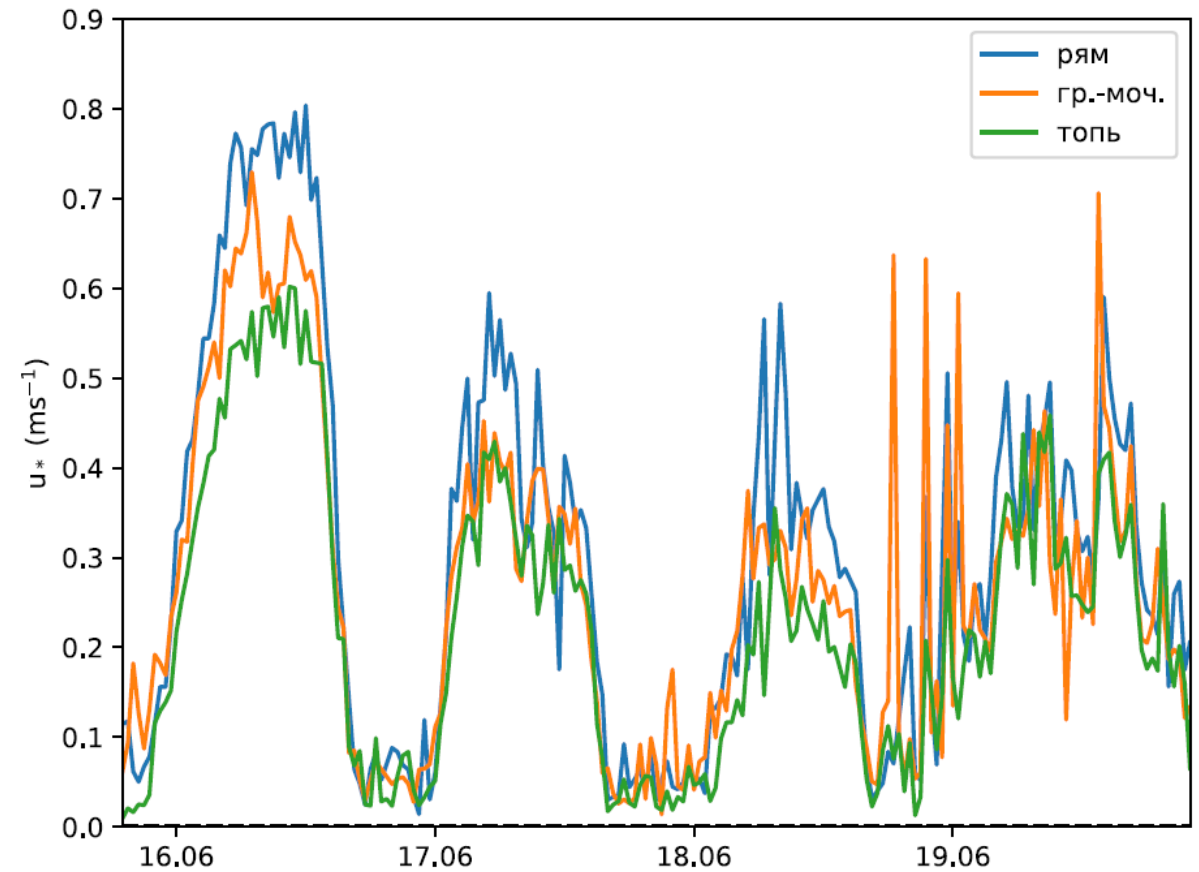
Днем поток скрытого тепла над рямом
несколько меньше, чем над остальными
элементами ландшафта, но различия не
велики

- шероховатость, влажность почвы,
стратификация, эвапотранспирация?



ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК ИМПУЛЬСА

Шероховатость ряма
самая высокая, топи —
самая низкая.



Численная модель DNS/LES/RANS

- «Бесшовный» DNS-, LES-, RANS- код разрабатываемый в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН

• DNS

- Система уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости
- Приближение Буссинеска для стратифицированных сред

• LES

- Фильтрованные уравнения Навье-Стокса →
- Смешанное замыкание + динамическая процедура
- Микрофизика и радиационный перенос (RRTMG)
- Блок переноса аэрозолей и химических примесей

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \bar{F}_i^e$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j - \text{подсеточный вклад}$$

• RANS

- Негидростатическая модель городской среды
- Гидростатическая модель водоемов →
- Двухпараметрическое (k-epsilon) замыкание

$$K_m \sim \frac{E^2}{\varepsilon} - \text{турбулентная вязкость}$$

$$\frac{DE}{Dt} = D_k + P + B - \varepsilon$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = D_\varepsilon + \frac{\varepsilon}{E} (C_{1\varepsilon} P + C_{3\varepsilon} B - C_{2\varepsilon} \varepsilon)$$

- Лагранжев перенос частиц



Численная модель DNS/LES/RANS

- Программный код на C/C++
- Разрешение **LES** для атмосферной турбулентности $\sim 5\text{-}10\text{ м}$, дополнительные ограничения для устойчивой стратификации $\sim 1\text{ м}$ и меньше
- **Высокое разрешение** в **DNS** требуется для воспроизведения всех пространственных и временных масштабов турбулентности
- Для **LES** и **DNS** расчетов необходимы параллельные вычислительные технологии
- **Re** до 2×10^5 в **DNS**. Вычислительная сетка: $\sim 10^9$ ячеек, число шагов по времени: $\sim 10^6 - 10^7$
- Реализация для суперкомпьютерных систем
 - **CPU**: MPI-OpenMP
 - **GPU**: MPI-OpenMP-CUDA
 - **Intel Xeon Phi**: MPI-OpenMP
 - **Kunpeng**: MPI-OpenMP



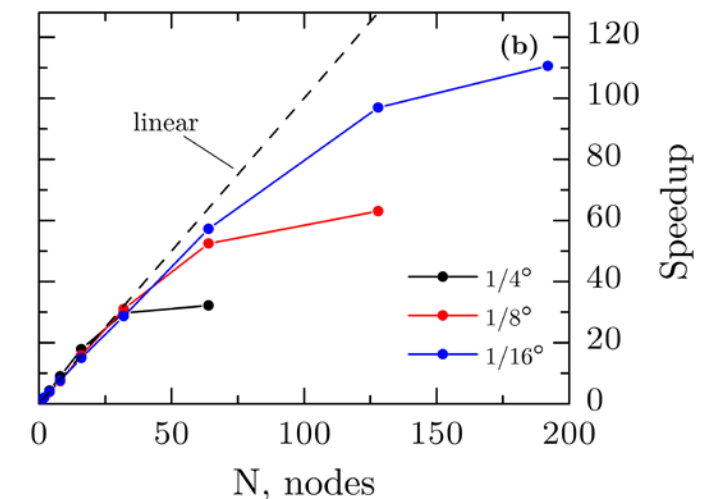
*Lomonosov-2 supercomputer,
©MSU, T-platforms*

**Intel Xeon CPU
Nvidia GPU**



*MVS-10P, -10Q
supercomputers,
©RAS, RSC Group*

**Intel Xeon CPU
Intel Xeon Phi**

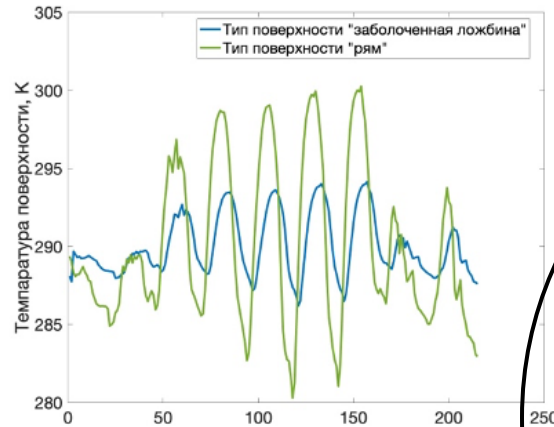


Масштабирование
кода на
суперкомпьютере
Mahti до 20000 ядер

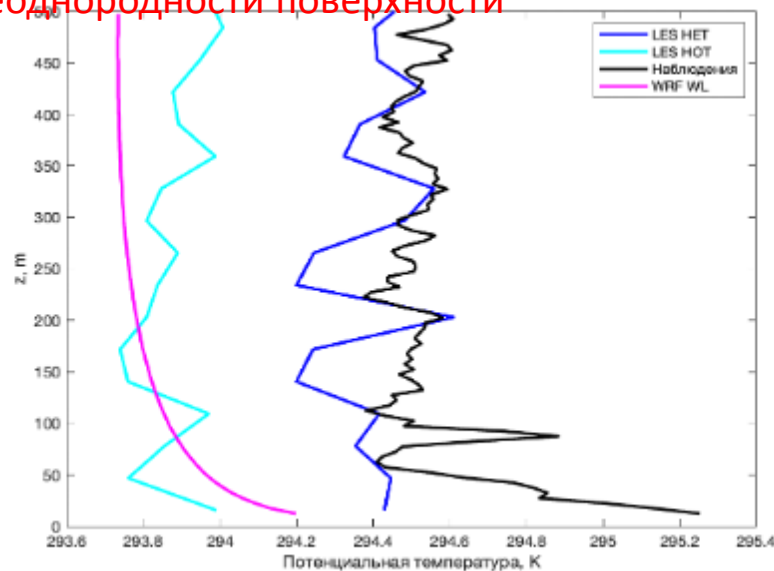
Вихреразрешающее моделирование

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

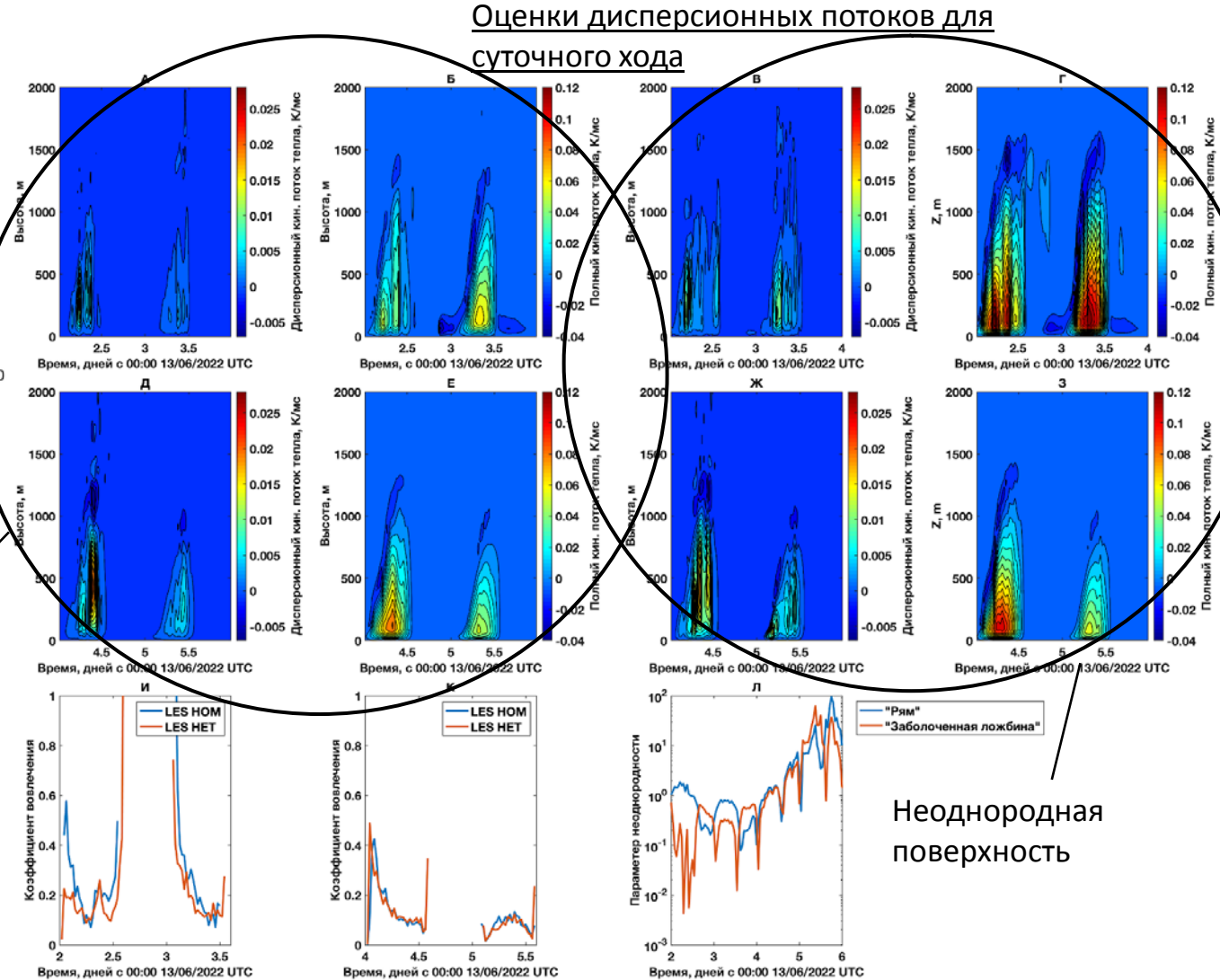
Идеализированная постановка для Мухрино, два типа поверхности: "рям" и "заболоченная ложбина"



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



Однородная поверхность

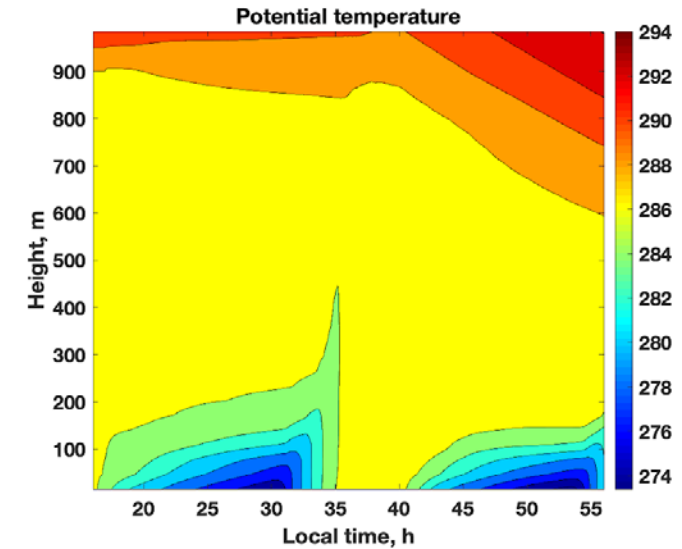
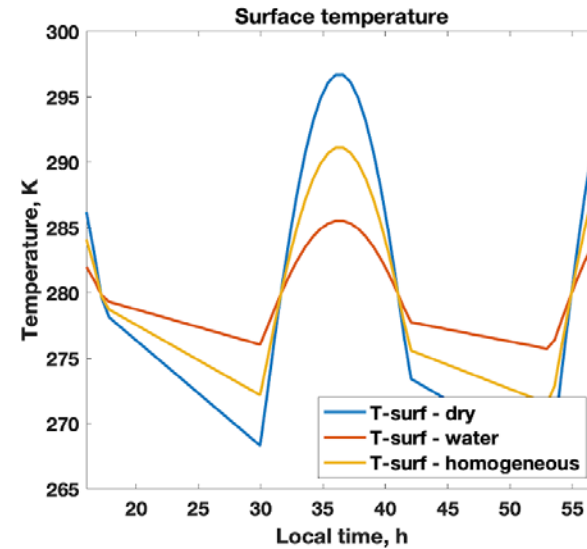


Неоднородная поверхность

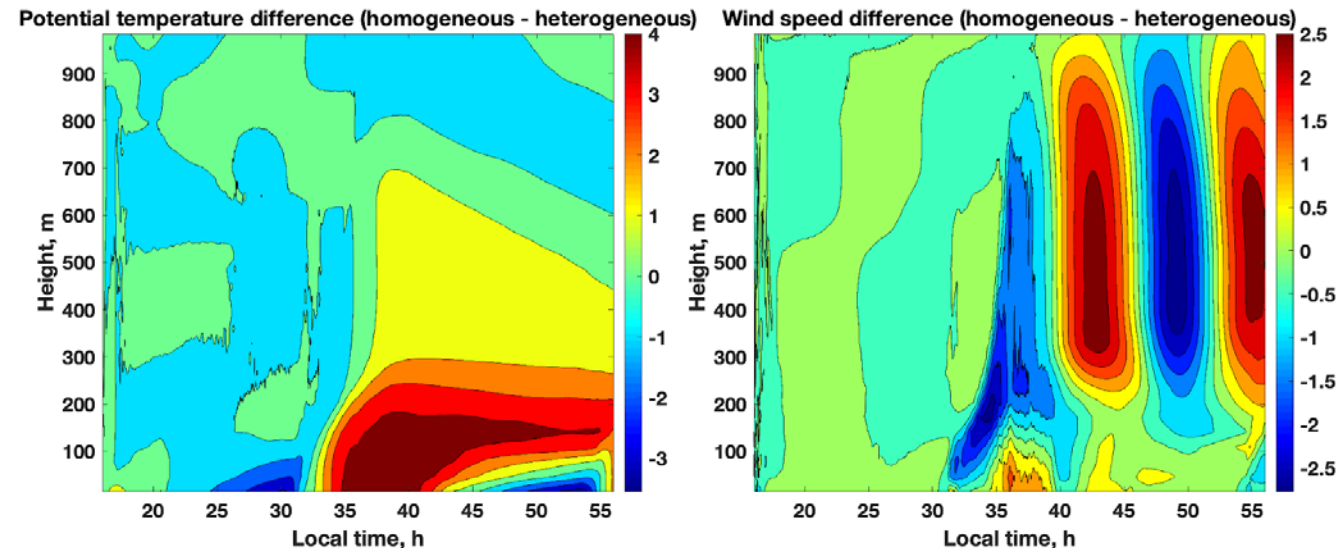
Вихреразрешающее моделирование

- Влияние термической неоднородности масштаба 10-100 м на суточный ход в атмосферном пограничном слое

Идеализированная постановка для двух типов поверхности характерных для «полигональной» тундры



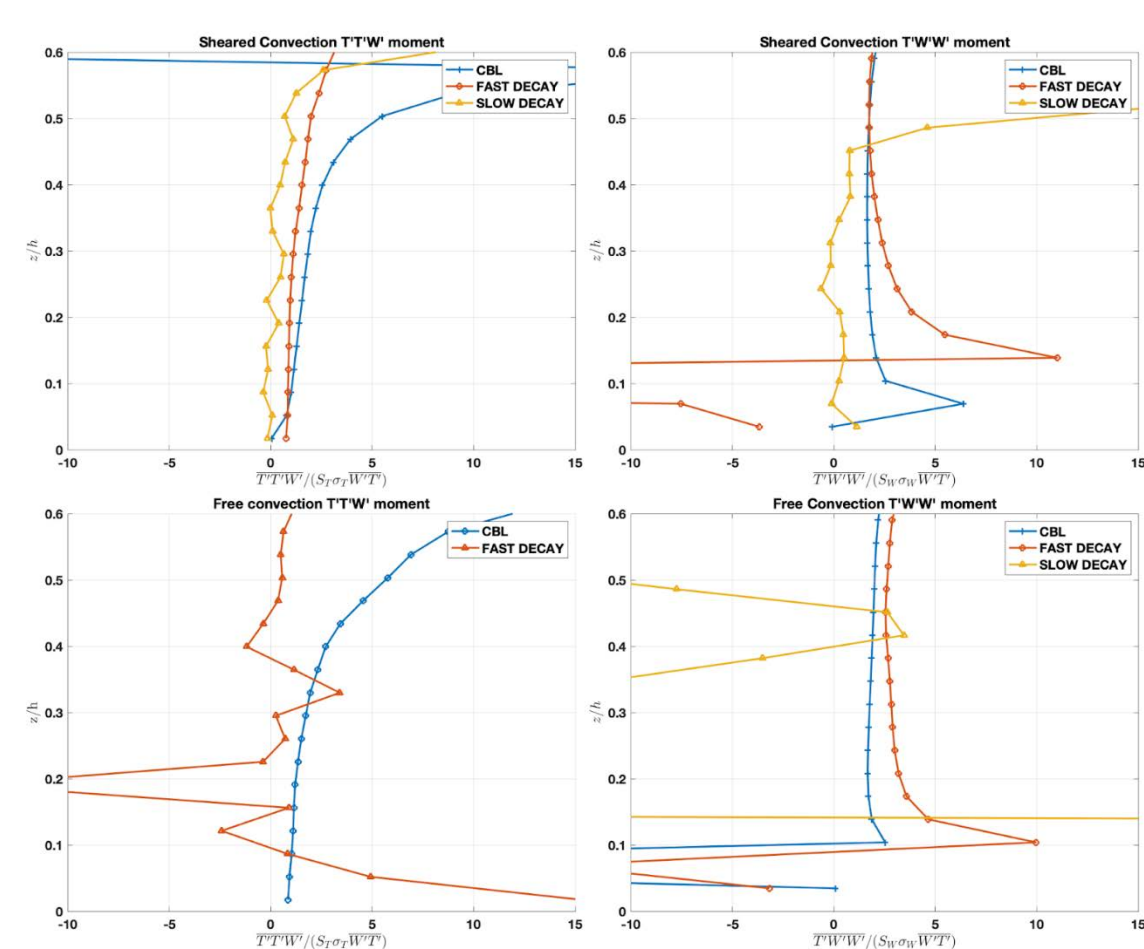
Разница в распределениях потенциальной температуры и скорости ветра для однородного и неоднородного случаев



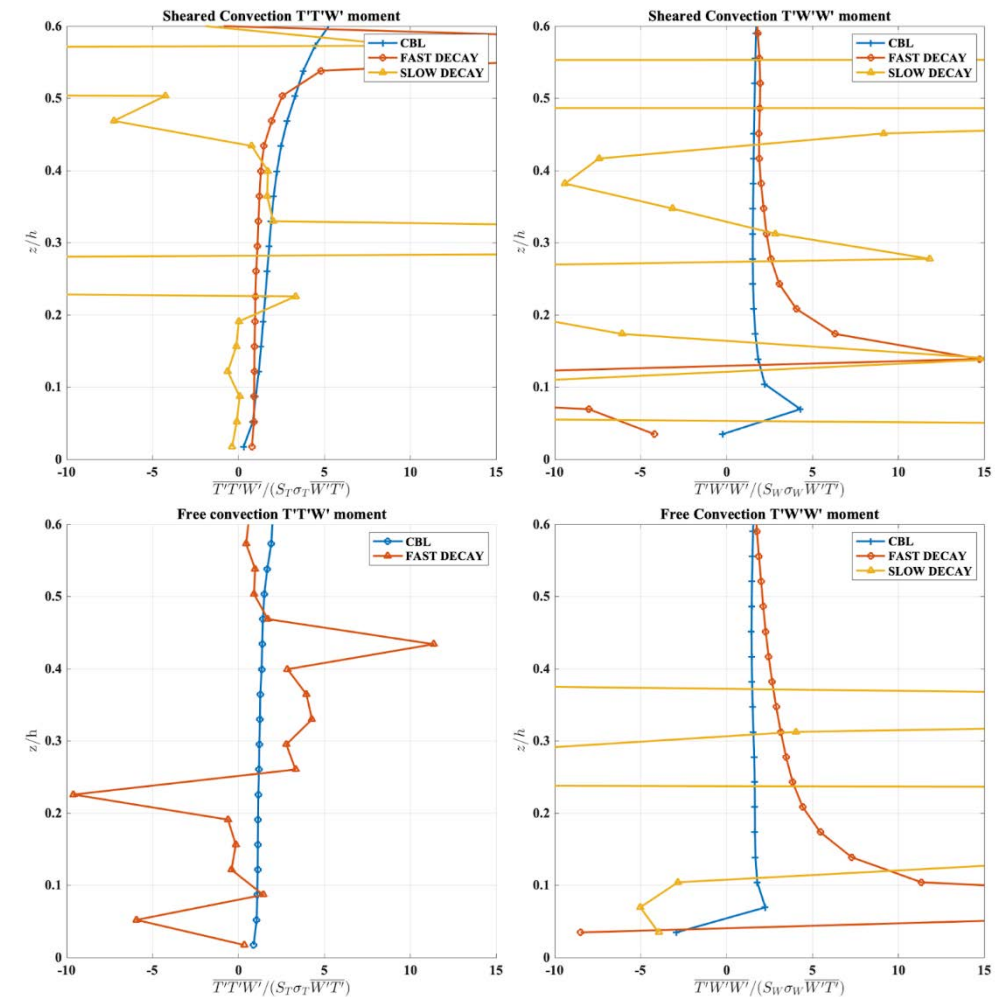
Вихреразрешающее моделирование

- Параметризации третьих моментов для термически неоднородной поверхности

Профили безразмерного отношения третьих и вторых моментов для параметризации (Zilitinkevich et al., 1999)



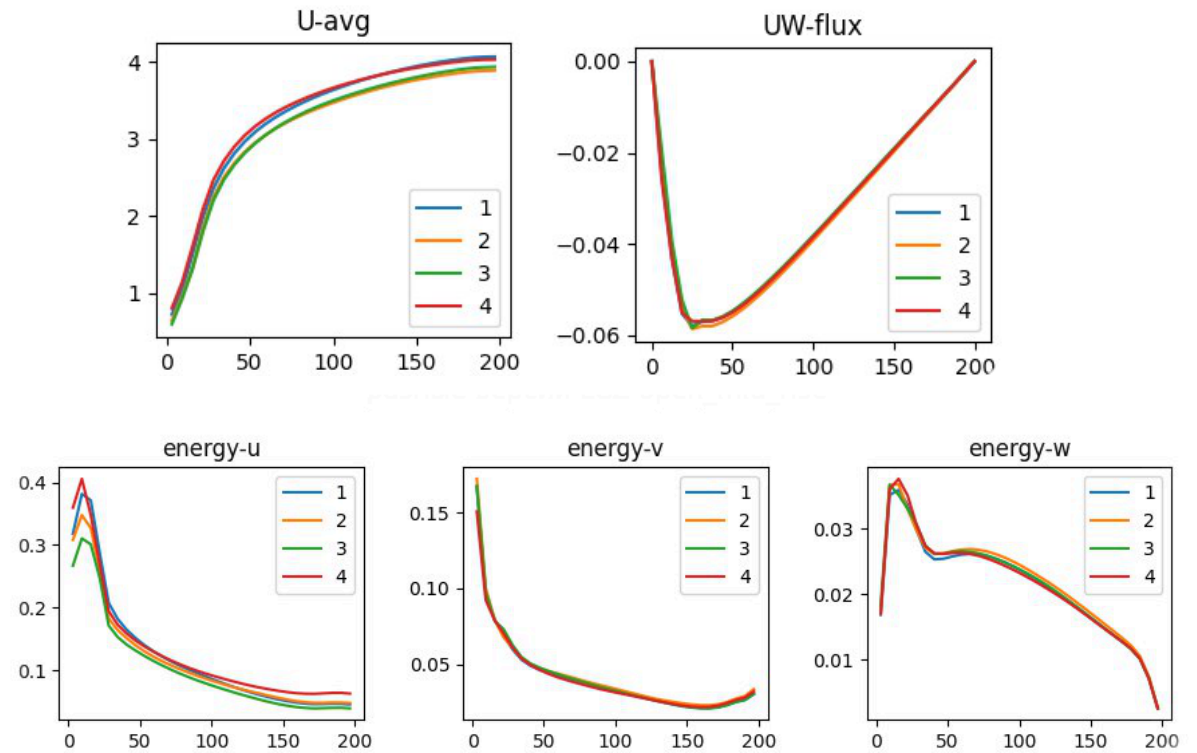
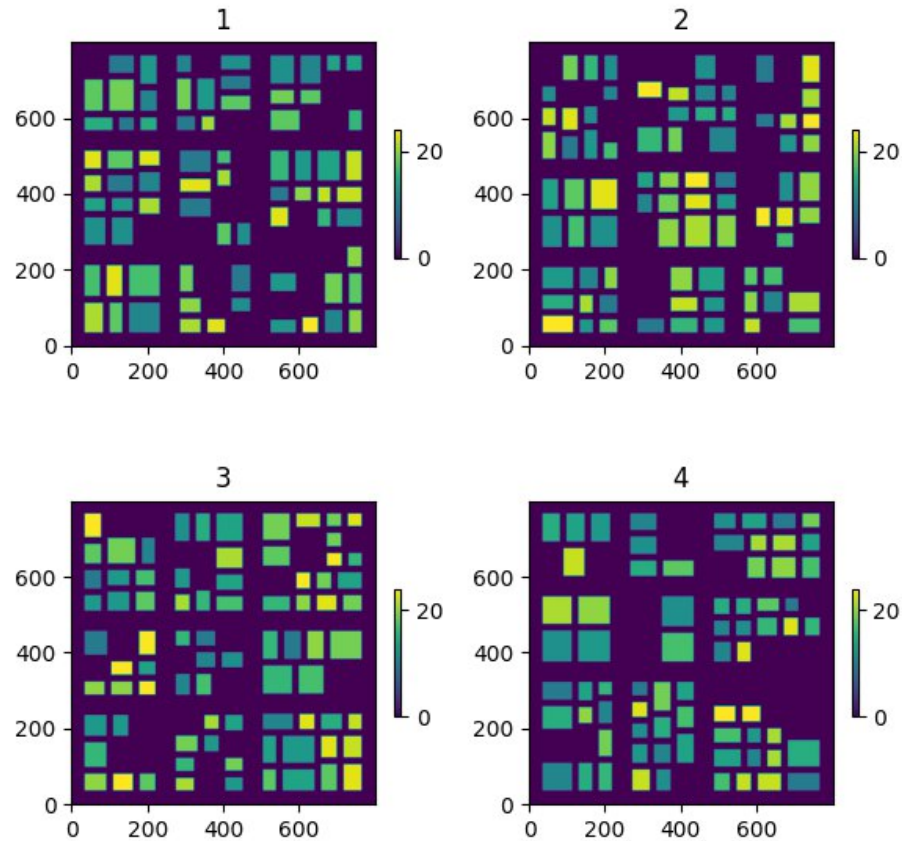
КПС и вечерний переходный период в однородном случае



КПС и вечерний переходный период в неоднородном случае

Вихреразрешающее моделирование

- Моделирование турбулентного потока для идеализированной городской застройки



Различные конфигурации открытой среднеэтажной застройки характерной для Москвы

Бликие распределения первых и вторых моментов для различных конфигураций застройки, но для одного типа локальной климатической зоны (LCZ) – возможность построения параметризаций на основе классификации LCZ

Натурный эксперимент и вихреразрешающее моделирование в городском каньоне

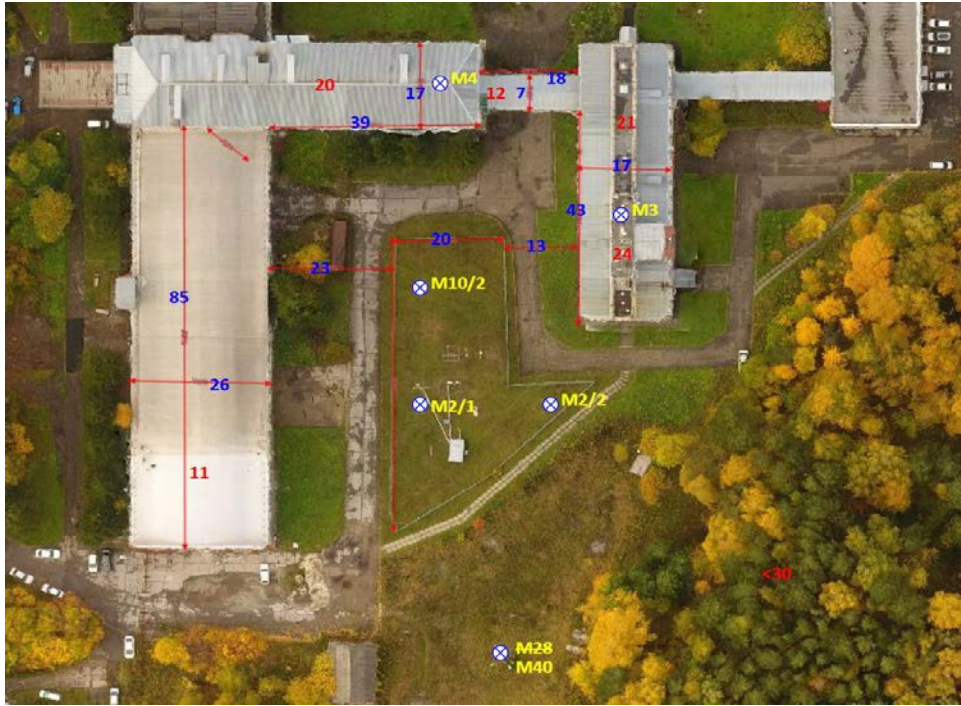
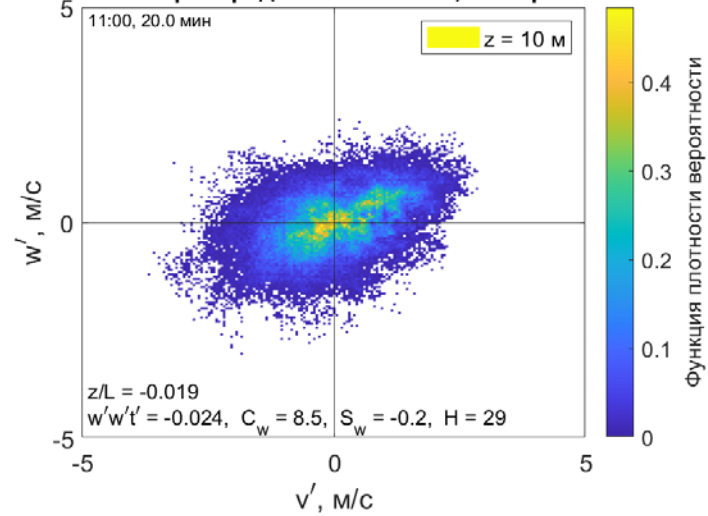
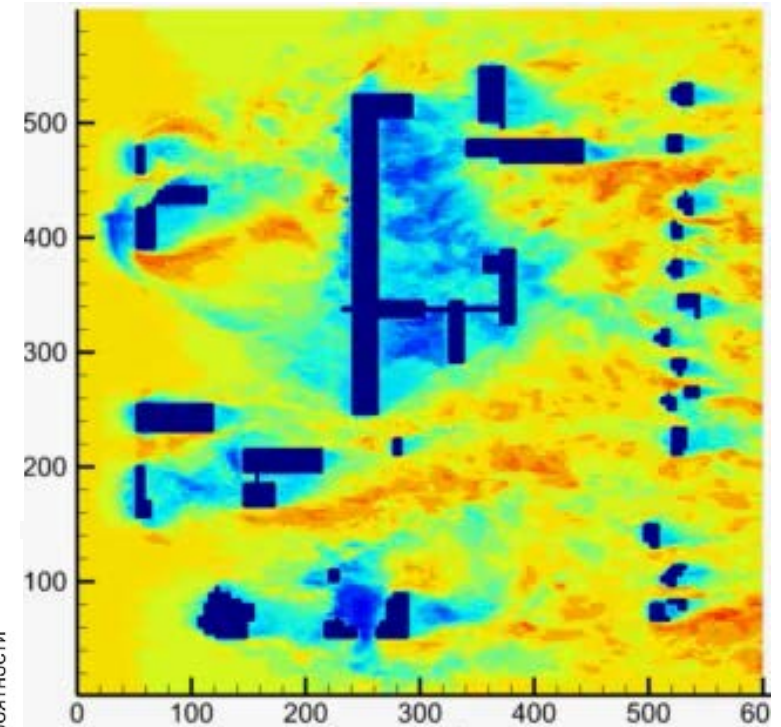
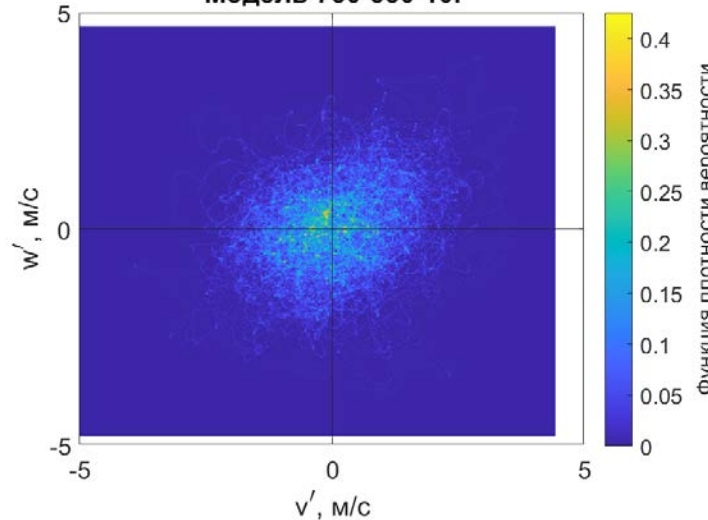


Схема расположения мачт Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, г. Томск
Совместные распределения представлены для точки M10/2 для акустического анемометра АМК-03, расположенного на высоте 10 м.

Совместное распределение. Томск, 10 апреля 2019



Модель 750-550-10.



Результаты расчёта вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ на высоте 10 м при натекающем потоке с запада. Скорость ветра выражена цветовой шкалой.

Выводы

Возможность использования для идентификации когерентных структур: квадрантный анализ, связи между третьим моментом и асимметрией вертикальной скорости,

Впервые на длинном ряде наблюдений подтверждена алгебраическая зависимость моментов разных порядков, предполагающая наличие организованных турбулентных структур, в условиях безразличной и устойчивой стратификации над поверхностью сложной геометрической формы.

Определены границы применимости теорий горизонтально статистически однородных пограничных слоёв над неоднородными ландшафтами различных типов. В случае прибрежной зоны значимую роль играют направление ветра, стратификация атмосферы и топография прибрежной зоны. В случае городской застройки важную роль в нарушении критериев подобия играют вторичные циркуляции, создаваемые сложным рельефом. В случае термической неоднородности турбулентные потоки определяются областью формирования потока.

Установлено, что течение над городским ландшафтом представляет собой сложное трехмерное течение, характеристики которого сильно зависят от положения измерения. Модель турбулентной вязкости продолжает работать внутри городского ландшафта, то есть возможно ввести масштаб длины l_m , который по своему смыслу является путем смещения Прандтля и фактически определяет топологические характеристики турбулентности в нейтральном случае внутри одного направления ветра.

На основании анализа полученных в проекте экспериментальных данных и мелкомасштабного моделирования определены подходы к модификации ТПМО для неоднородных ландшафтов. Первый подход основан на анализе соотношения вторых и третьих моментов, что позволяет выявлять наличие когерентных структур в потоке. Установлено, что классические соотношения ТПМО непригодны для описания безразмерных градиентов скорости ветра и температуры над неоднородным ландшафтом, так как не учитывается нелокальный перенос. В качестве новых критериев предлагается использовать соотношение дисперсии вертикальной скорости ветра и динамической скорости и масштаб длины, характеризующий турбулентное перемешивание и расстояние до ближайших неоднородностей. Разработана обобщенная модель масштабирования сложной атмосферной турбулентности с учетом анизотропии.

Спасибо за внимание

