Связи скорости ветра и турбулентной энергии со структурой тензора напряжений Рейнольдса в приземном слое атмосферы

КОЗЬМИНА А.С., ГАЛИЧЕНКО С.В., АНИСИМОВ С.В.

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «БОРОК» ИФЗ РАН

Перенос и перемешивание в приземном слое атмосферы во многом определяются анизотропной природой турбулентности. В последние годы развивается подход, в котором анизотропия тензора напряжений Рейнольдса рассматривается как дополнительный параметр теории подобия приземного слоя. Поэтому актуальна задача количественного описания структуры тензора и ее связи с метеорологическими факторами.

Почему одной турбулентной энергии недостаточно

Анизотропия Reynolds-тензора рассматривается как самостоятельная характеристика состояния приземной турбулентности

Интенсивность

k

Сколько энергии содержат пульсации скорости?

Структура

1C ↔ 2C ↔ 3C

Как энергия распределена между собственными компонентами?

Ориентация

θ

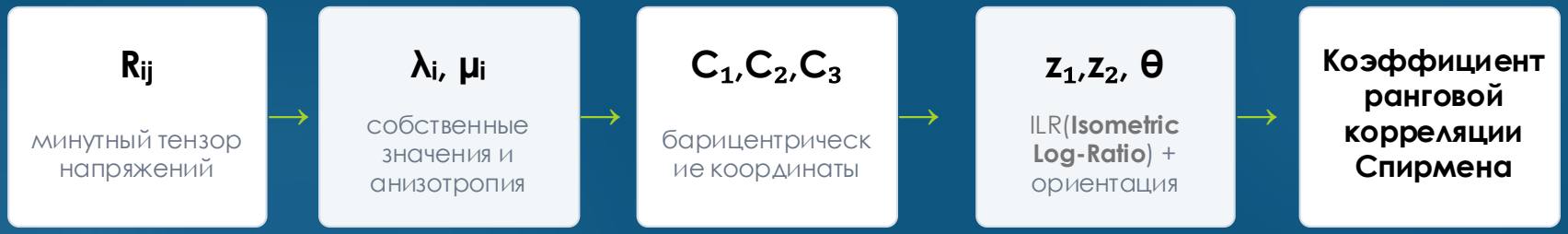
Как собственная ось минимальной дисперсии ориентирована относительно вертикали?

Цель текущего этапа: определить, как тепловой поток, скорость горизонтального ветра U и достигнутый уровень k статистически связаны со структурой тензора Рейнольдса.

Данные и вычислительная схема

11 ясных/безосадочных суток июля 2026 г.; единица анализа — одна минута

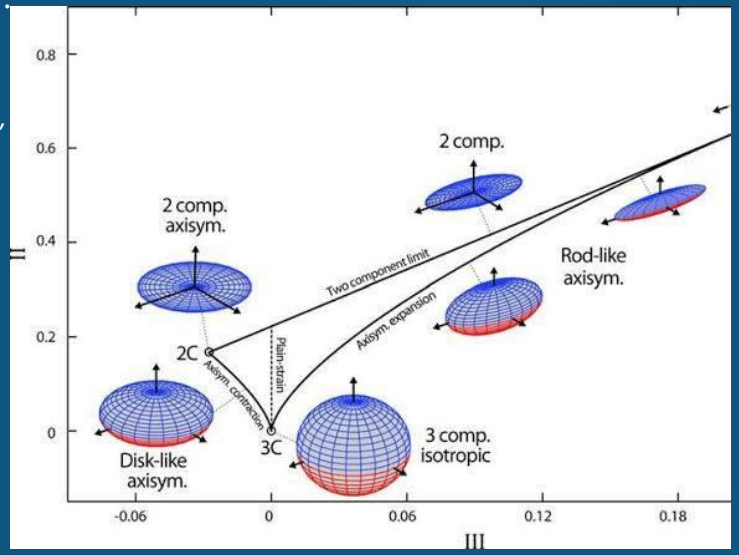
11	15 840	3 × 6 ч	1 мин	11 × 3
суток	минутных состояний	интервалы: 00–06, 09–15, 18–24	временное разрешение	интервальные медианы



- Синхронные факторы: U, вертикальный турбулентный поток тепла H, метеорологические параметры.
- Статистическая единица вывода — сутки; минутные отсчёты не трактуются как независимые наблюдения.

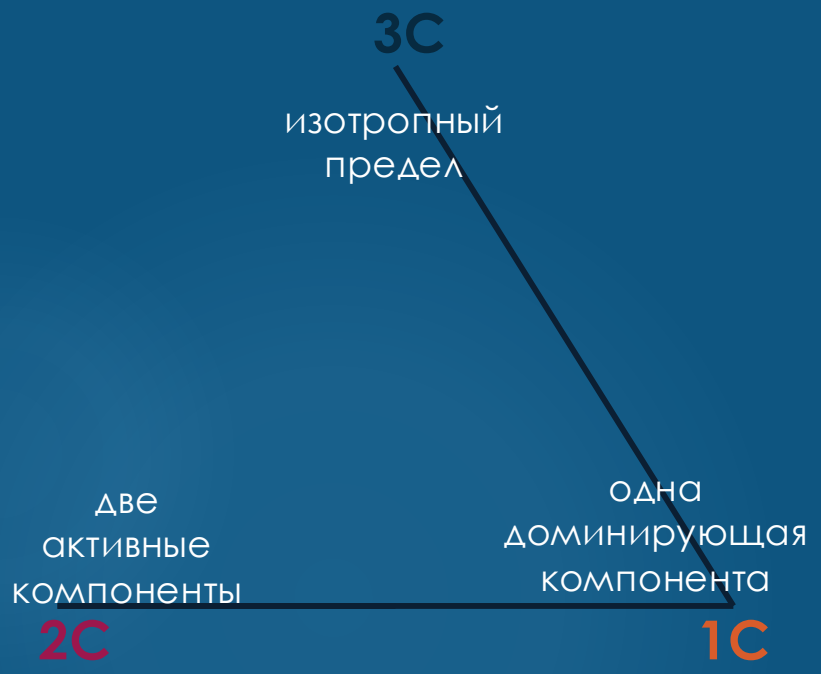
Что такое анизотропия турбулентности (1C / 2C / 3C)

- **Анизотропия** – это неравенство интенсивности пульсаций скорости в разных направлениях.
- Описывается через собственные значения тензора анизотропии Рейнольдса:
  - **3C (Three-Component)**: Изотропная турбулентность. Пульсации равны во всех 3-х направлениях («сфера»).
  - **2C (Two-Component)**: Осьесимметричная турбулентность. Пульсации подавлены в одном направлении и равны в двух других («диск» или «блин», характерно для пристенных течений).
  - **1C (One-Component)**: Сильно анизотропная турбулентность. Пульсации доминируют строго в одном направлении («игла» или «стержень», характерно для зон сильного сдвига или струй).
- **Эволюция режимов**: Турбулентность нестационарна; она переходит между состояниями (например, от 3C к 2C) под действием сдвига, плавучести или стенок.
- **Выявление цикличности**: На масштабе 11 дней можно обнаружить суточные циклы, влияние погодных фронтов или периодические структуры.
- **Валидация моделей**: Понимание реальной динамики анизотропии критически важно для проверки и улучшения моделей турбулентности (RANS/LES), которые часто делают упрощающие предположения.



От собственных значений к барицентрическим и ILR-координатам

1C, 2C и 3C — предельные вершины непрерывного пространства реализуемых состояний



ILR-представление композиции

$z_1 = (1/\sqrt{2}) \ln(C_1/C_2)$ $z_2 = \sqrt{(2/3)} \ln(\sqrt{(C_1C_2)}/C_3)$

- $z_1 \downarrow \Rightarrow$ баланс смещается от 1C- к 2C-подобной компонентальности.
- $z_2 \downarrow \Rightarrow$ относительный вклад C_3 растёт по сравнению с $\sqrt{(C_1C_2)}$.
- θ - угол между собственной осью минимальной дисперсии и вертикалью.

Преимущество ILR: две независимые евклидовы координаты вместо трёх связанных долей $C_1+C_2+C_3=1$.

Объяснение барицентрической карты анизотропии

Треугольник состояний:

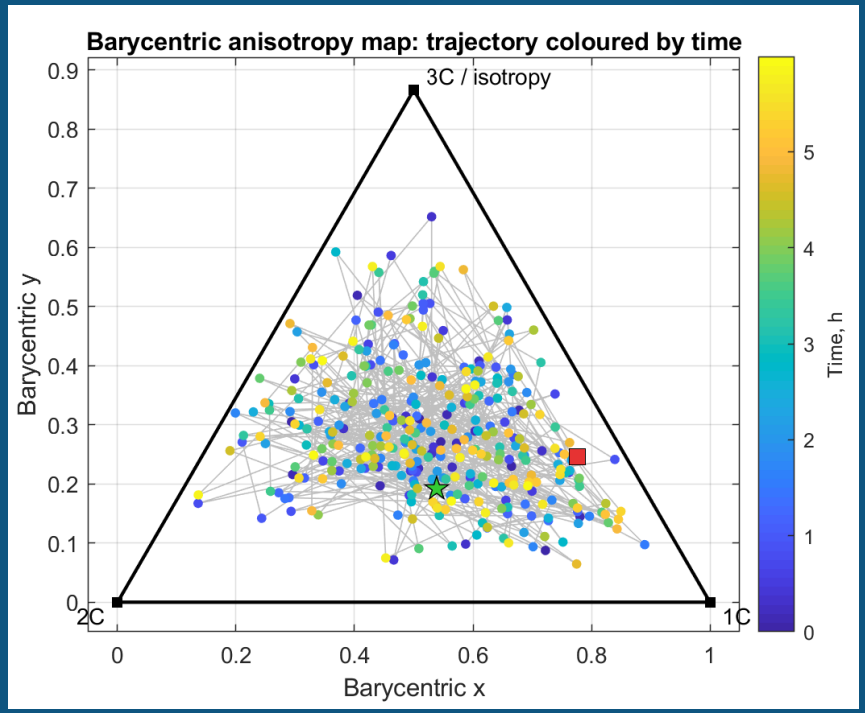
- **3C / Isotropy** (верхняя вершина) — изотропная турбулентность, все три компоненты равны
- **2C** (левая нижняя вершина) — двухкомпонентная турбулентность, одна компонента подавлена
- **1C** (правая нижняя вершина) — однокомпонентная турбулентность, доминирует одна компонента

Координаты:

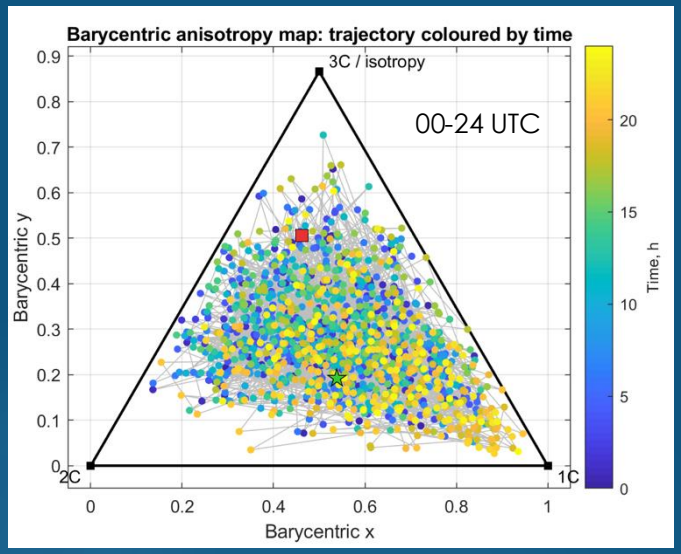
- **Barycentric x** (горизонтальная ось, 0–1) — положение между 2C и 1C
- **Barycentric y** (вертикальная ось, 0–0.9) — близость к изотропии (3C)
- Любая точка внутри треугольника = реальное состояние турбулентности

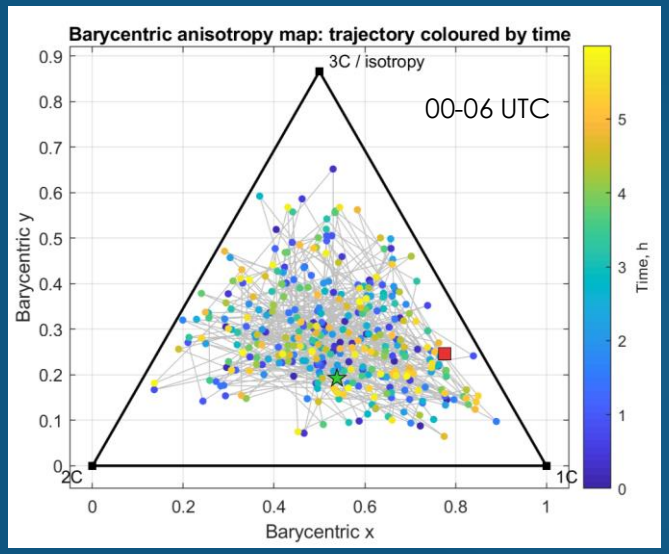
Визуализация:

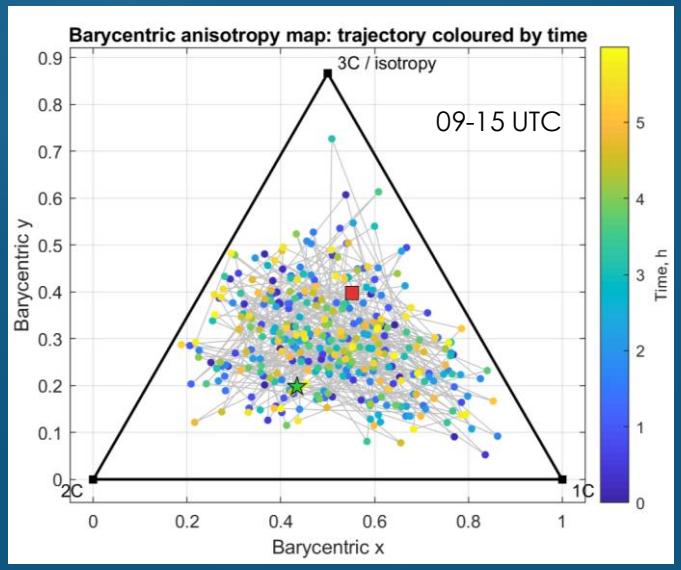
- **Цвет точек** = время (0–6 ч на примере, данные за 11 дней)
- **Серые линии** = траектория эволюции состояния во времени

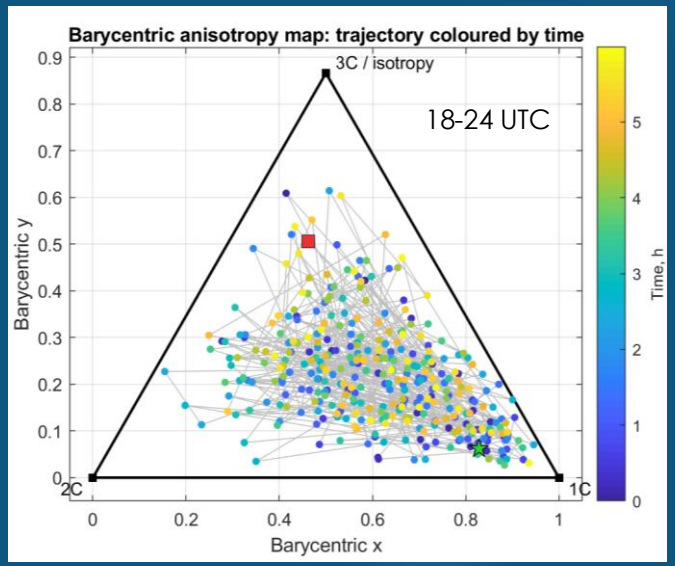


Рассматривались не только полные сутки, но и отдельные промежутки



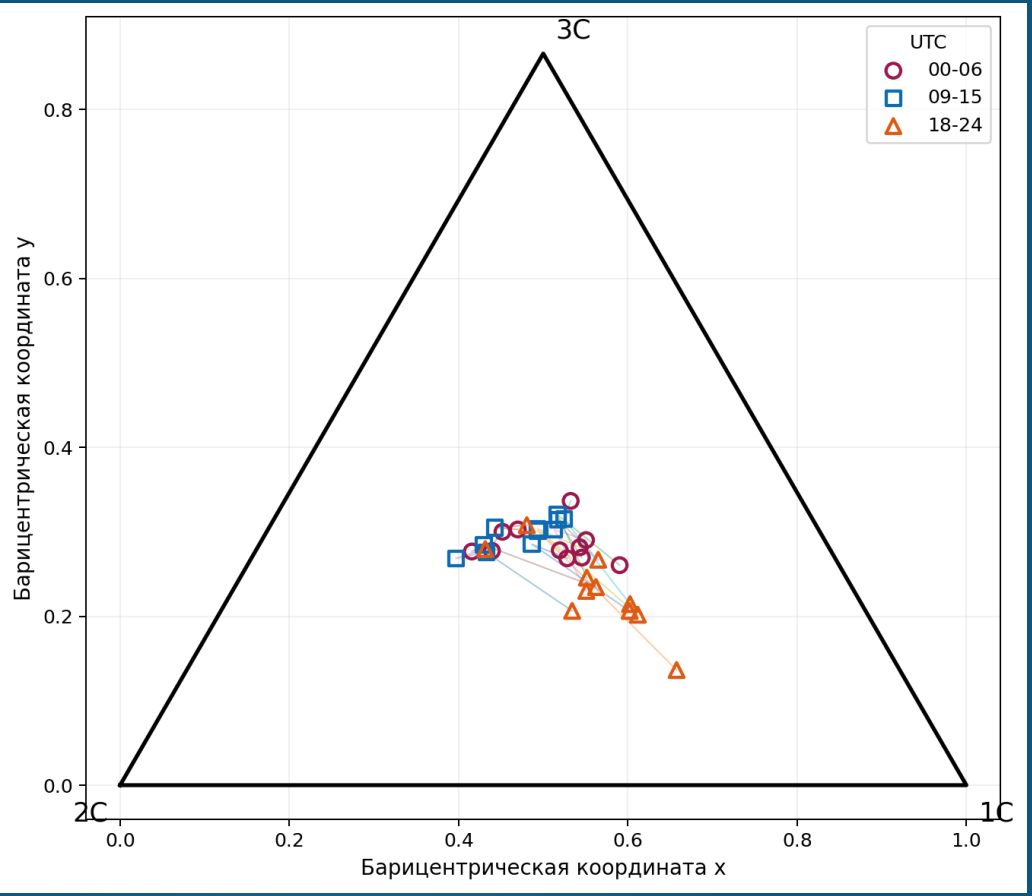






Структурные состояния меняются между временными интервалами

33 интервальных медианы: 11 суток × 00–06, 09–15 и 18–24 UTC



Что видно

Состояния занимают ограниченную внутреннюю область треугольника — ни один из предельных режимов не доминирует постоянно.

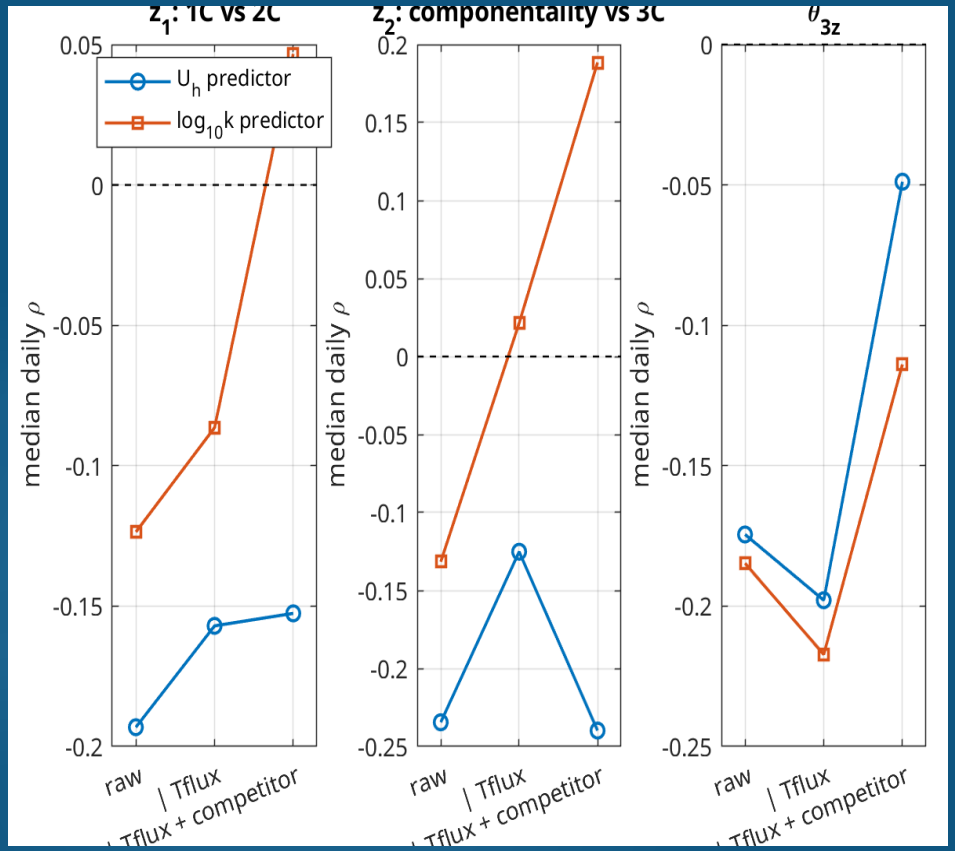
Участки 00–06, 09–15 и 18–24 визуально различаются по положению; количественная проверка этих различий рассматривается как предварительная.

Для количественного разделения этих сдвигов далее используются z_1 и z_2, а не визуальная классификация по вершинам.

Барицентрическая карта задаёт геометрию состояния.

Как выполняется контроль конкурирующего фактора

Предварительный анализ • частичная ранговая корреляция Спирмена



Что означает «контроль»?

1. Переходим к рангам:

$X^* = \mathrm{rank}(X),\ Y^* = \mathrm{rank}(Y)$
$Z^* = \mathrm{rank}(Z)$

2. Удаляем часть, связанную с Z:

$r_x = X^* - \hat{X}^*(Z^*)$
$r_y = Y^* - \hat{Y}^*(Z^*)$

3. Коррелируем остаточные ранги:

$\rho_s(X,Y \mid Z) = \mathrm{corr}(r_x, r_y)$

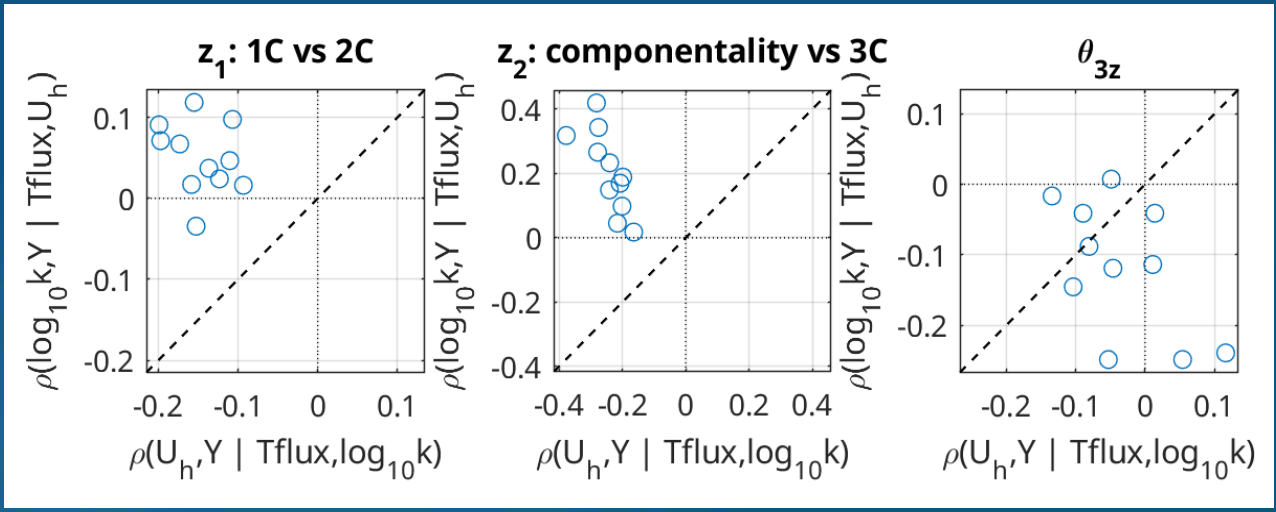
Для двух контролей
$Z = \{H, \log_{10}k\}$.

Пример: $\rho_s(U, z_2 \mid H, \log_{10}k) < 0$

После удаления ранговой связи обоих рядов с H и k остаточные ранги U и z_2 связаны отрицательно.

Предварительная воспроизводимость условных связей по суткам

Каждая точка — отдельные сутки;
оси — частичные ранговые корреляции после контроля конкурирующего предиктора



Как читать график

$x = \rho_s(U,Y \mid H, \log_{10}k)$

$y = \rho_s(\log_{10}k,Y \mid H, U)$

Квадрант x<0, y>0 означает противоположные условные ассоциации U и k с одной и той же структурной координатой Y.

Знаки по 11 суткам

$U–z_1 < 0$	**11/11**	**$k–z_1 > 0$**	**10/11**
$U–z_2 < 0$	**11/11**	**$k–z_2 > 0$**	**11/11**

Рабочий вывод: U и k, вероятно, несут различную структурную информацию.
Механистическая трактовка пока не фиксируется.

Выводы:

- **Роль параметров:** Скорость ветра (U) и турбулентная энергия (k) по-разному связаны со структурой тензора напряжений Рейнольдса.
- Барицентрическое/ILR-представление показывает различия положения состояний между временными интервалами; их статистическая устойчивость ещё проверяется.
- Предварительно: H сохраняет положительную связь с k после контроля U, но устойчивой связи со структурными ILR-координатами пока не видно.
- Предварительно: после взаимного контроля U и k их связи с z_1 и z_2 различаются по знаку. Причинная интерпретация пока не проводится.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2025-0049.

- Спасибо за внимание!