



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Методы диагностики атмосферы с высоким пространственным разрешением

Шиховцев А.Ю. (1), Коваadlo П.Г. (1), Леженин А.А. (2,1), Градов В.С. (2)

(1) Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

(2) Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия



**Создание новой астрономической инфраструктуры наземного базирования и
выбор места**

**Оснащение солнечных телескопов системами адаптивной оптики,
экспериментальных систем МСАО**

**Вертикальные профили оптической турбулентности и других атмосферных
характеристик и разработка методов атмосферной томографии**

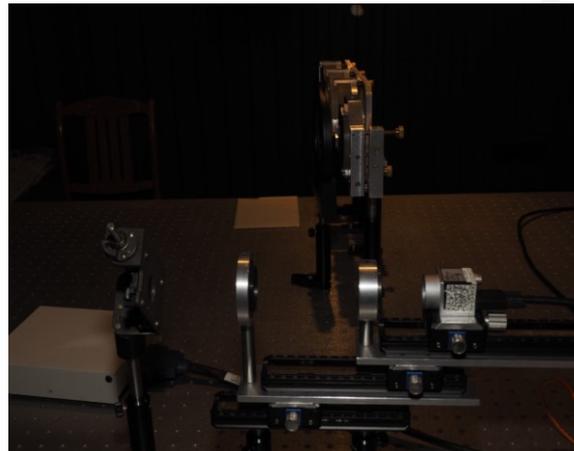


Разработан метод измерений профилей турбулентности

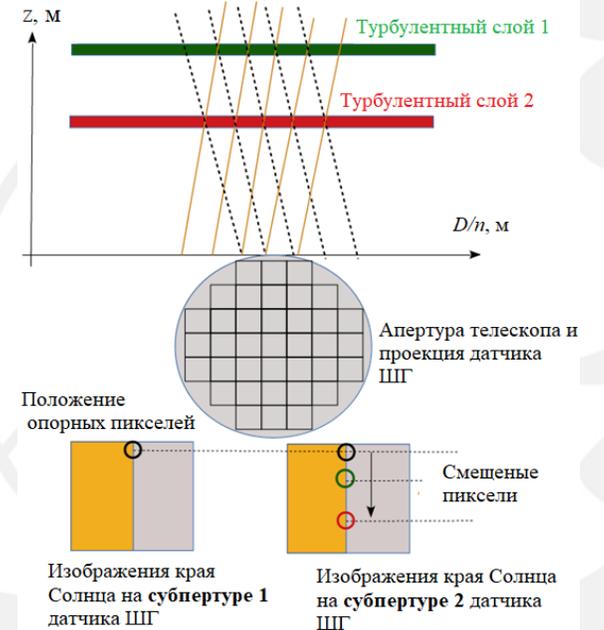


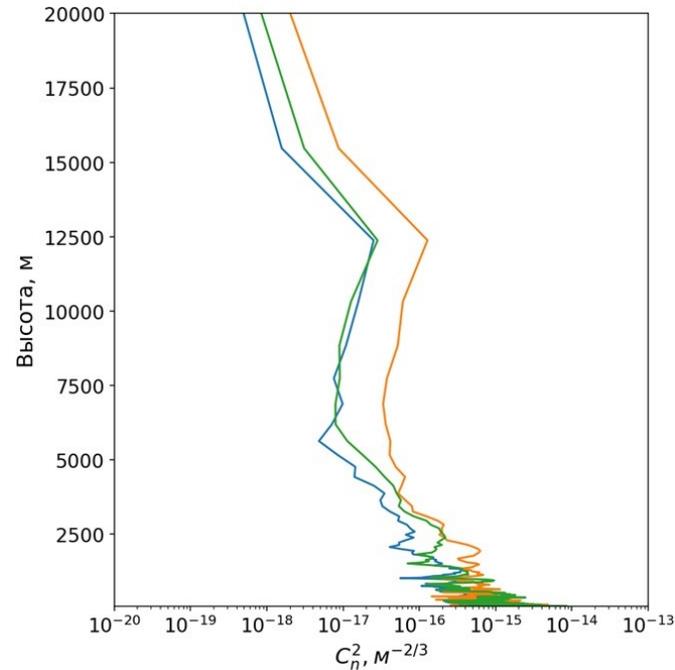
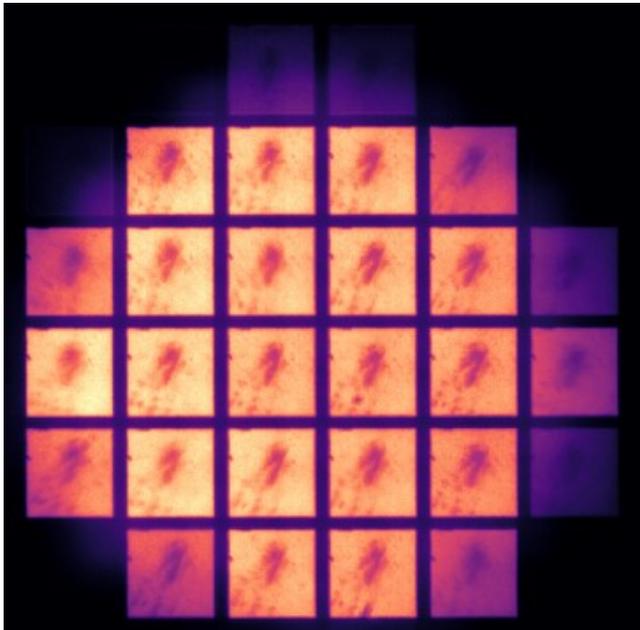
$$C_{xs} = \langle \delta_1(s, 0) \delta_2(s, \theta) \rangle = \sum_{i=1}^M c_{ni} F_x(s, \theta, h_n)$$

$$c_n = 5.98 D_{eff} (h_n)^{-1/3} C_n^2 dh / \cos z$$



Датчик ШГ в измерительной
схеме БСВТ





кальная плоскость
эрога перестраивающего
зеркала АО БСВТ

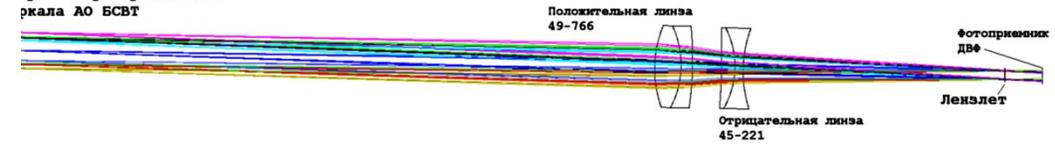


Рисунок . Оптическая схема для второго датчика волнового фронта. Фокальная плоскость второго перестраивающего зеркала АО расположена за делительным кубиком из К8 толщиной 60 мм.

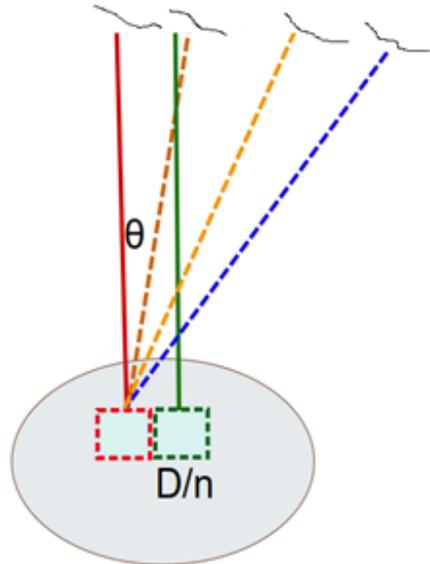
Измеренные вертикальные профили оптической турбулентности, БСВТ

Необходимость в изменении параметров датчика ШГ для детекции турбулентности верхних слоев.

Построение системы с двумя датчиками ШГ каждый из которых работает в узком поле зрения при общем поле 120 угл.сек.



Положения "опорных звезд" в разные моменты времени



Апертура телескопа и проекции двух субапертур датчика ШГ

Перекрещивающиеся пучки от одного и того же объекта, который смещается во времени

Продвижение в измерениях профилей турбулентности

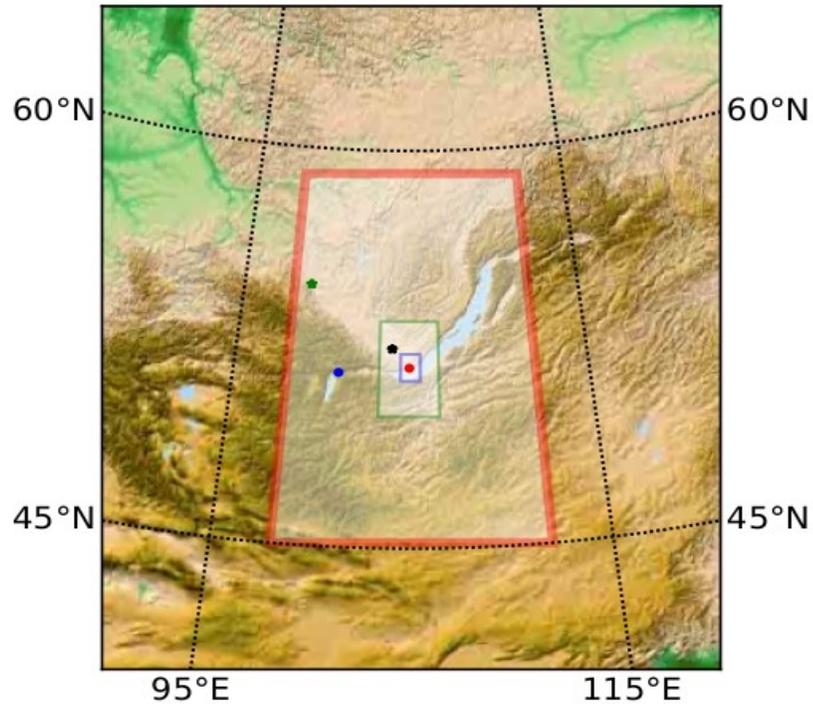
В сравнении с мировыми аналогами возрастает разрешение метода: количество областей с перекрещивающимися оптическими пучками увеличивается за счет учета углового смещения солнечного объекта по небосводу в течение дня.

Из-за углового смещения Солнца по небосводу во времени формируются области скрещенных пучков (между оптическим пучком в начальный момент времени на опорной субапертуре и оптическими пучками в последующие моменты времени на разнесенных субапертурах).

Патент на изобретение. Коваadlo П.Г., Шиховцев А.Ю.
СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ
КОРРЕКЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.
RU 2712464 C1. 2020.

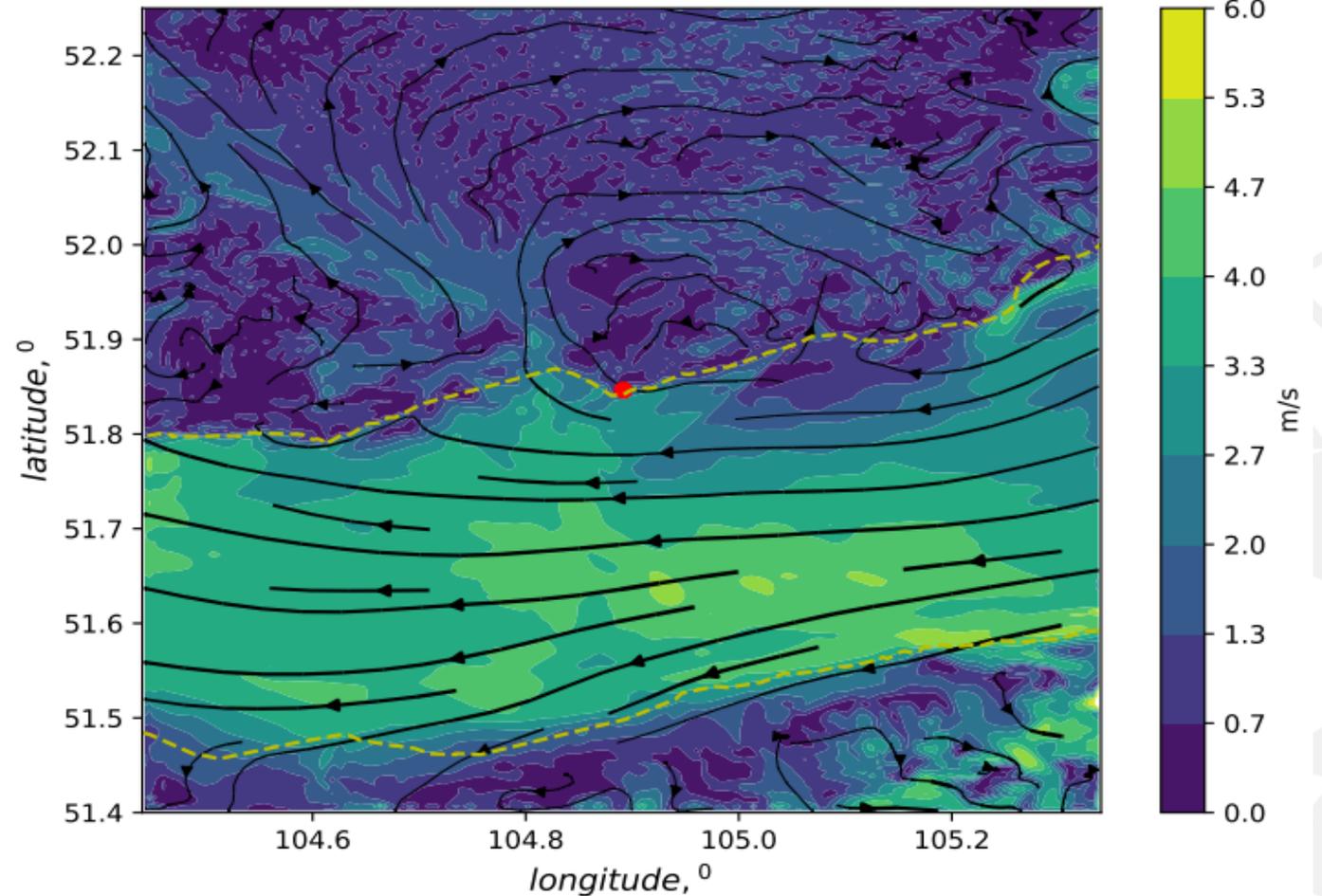


Впервые выполнены исследования атмосферных процессов в приложении к описанию влияния мезомасштабных вихревых структур на генерацию и подавление мелкомасштабной оптической турбулентности.



- BAO
- SSO
- Angarsk
- Nizhneudinsk

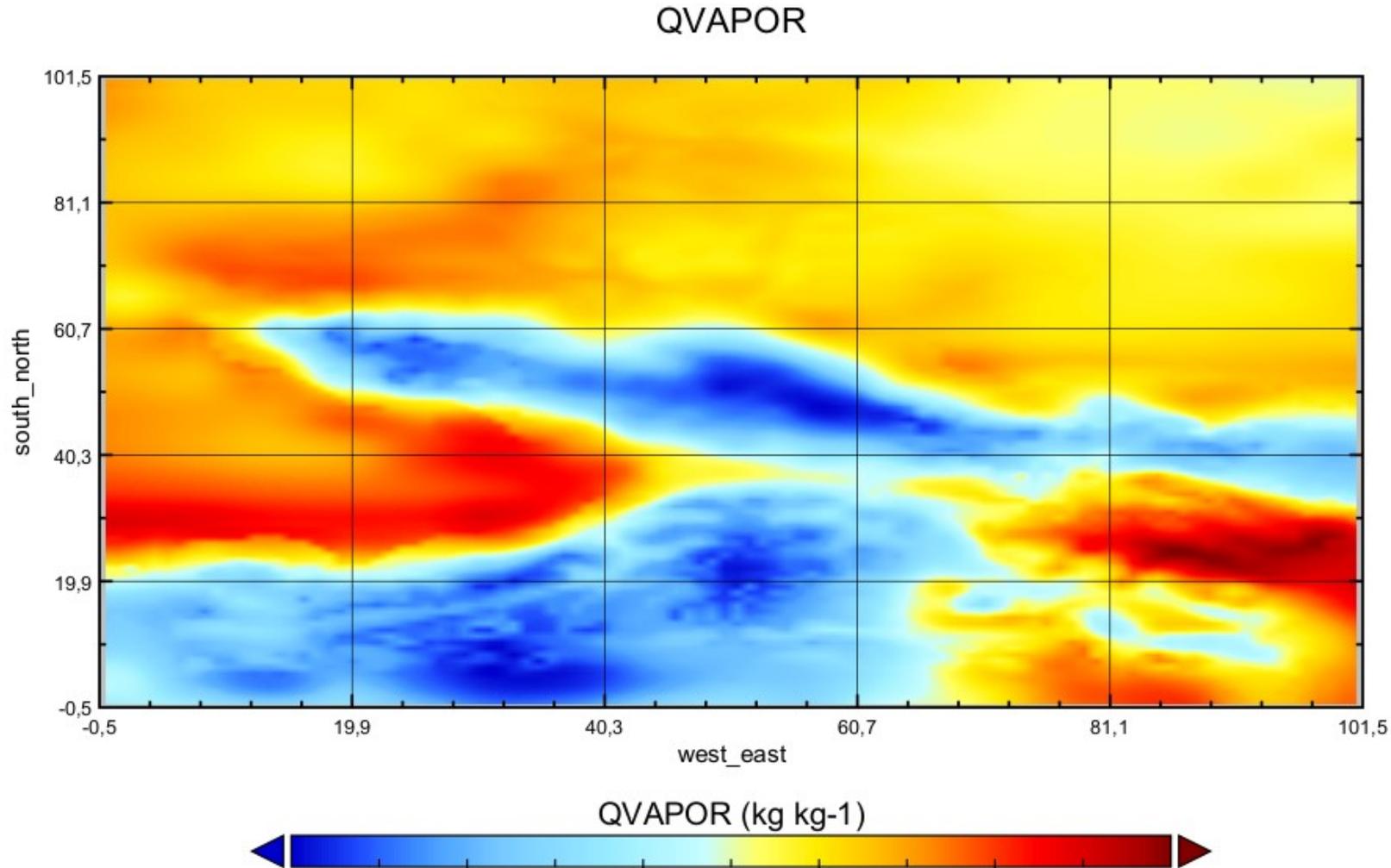
Исследуемый регион



Пространственное распределение скорости потока с разрешением **500 м** с применением модели WRF. Желтая линия - береговая линия оз. Байкал



Распределение содержания водяного пара в столбе атмосферы в регионе CAO, модель WRF (2024-03-25_00_00_00 UTC) с горизонтальным разрешением 500 м.





Впервые с применением модели WRF получены вертикальные профили дневной турбулентности

Профили оценены с привлечением вертикальных профилей метеорологических характеристик и расчетных значений внешнего масштаба

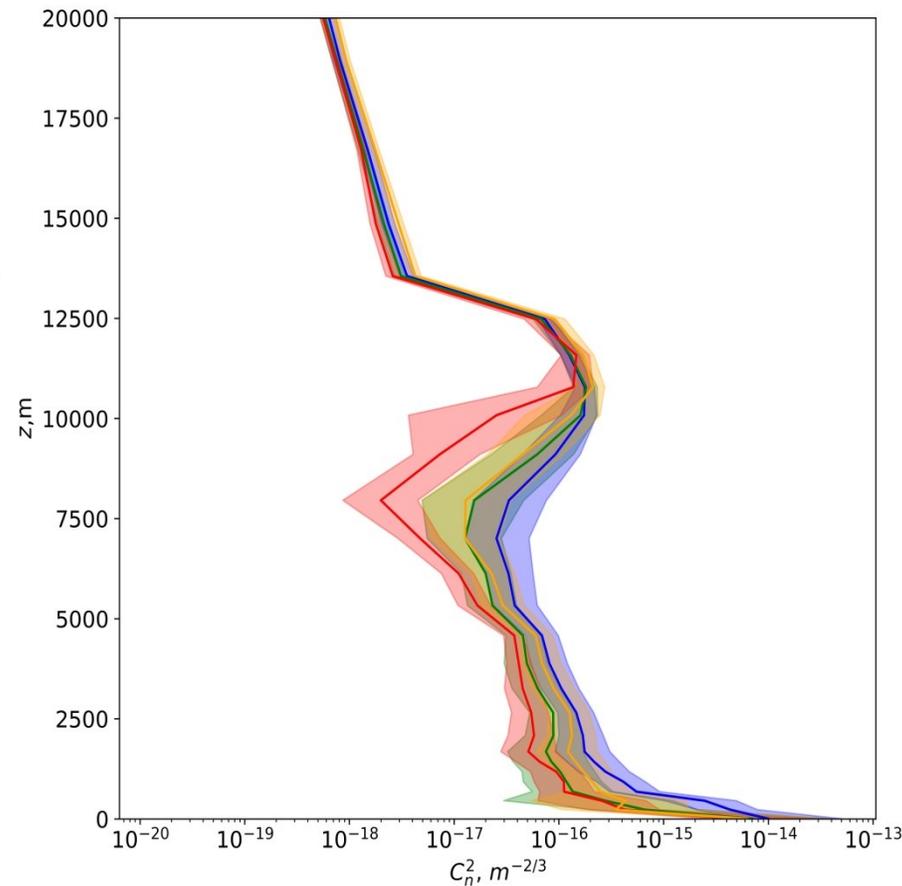
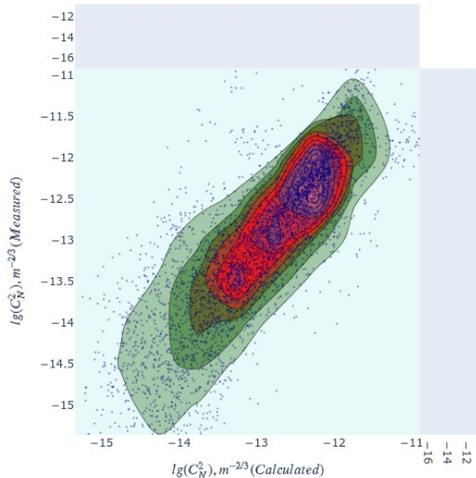
$$C_n^2(z) = aL_0(z)^{4/3}M(z)^2,$$

$$M = \left(\frac{-79 \cdot 10^{-6}P}{T} \right) \frac{\partial \ln \theta}{\partial z},$$

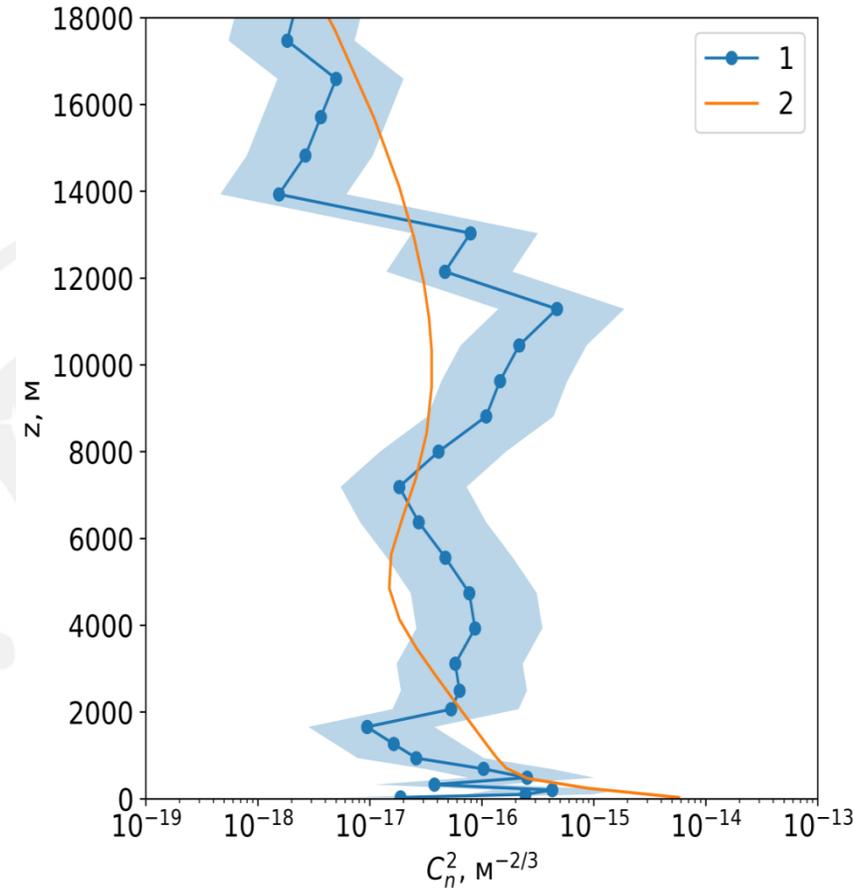
$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \cdot 10^{1.64+42 \cdot S}, & \text{тропосфера} \\ 0.1^{4/3} \cdot 10^{0.506+50 \cdot S}, & \text{стратосфера} \end{cases},$$

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{0.5}.$$

2D Density Plot



Горизонтальное разрешение 30 км



Горизонтальное разрешение 500 м



Применение нейронных сетей для оценки интегральной интенсивности турбулентности (параметра seeing)

$$seeing = \frac{0.98\lambda}{\left(0.423\sec\alpha\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \int_0^H C_n^2(z)dz\right)^{-3/5}}$$



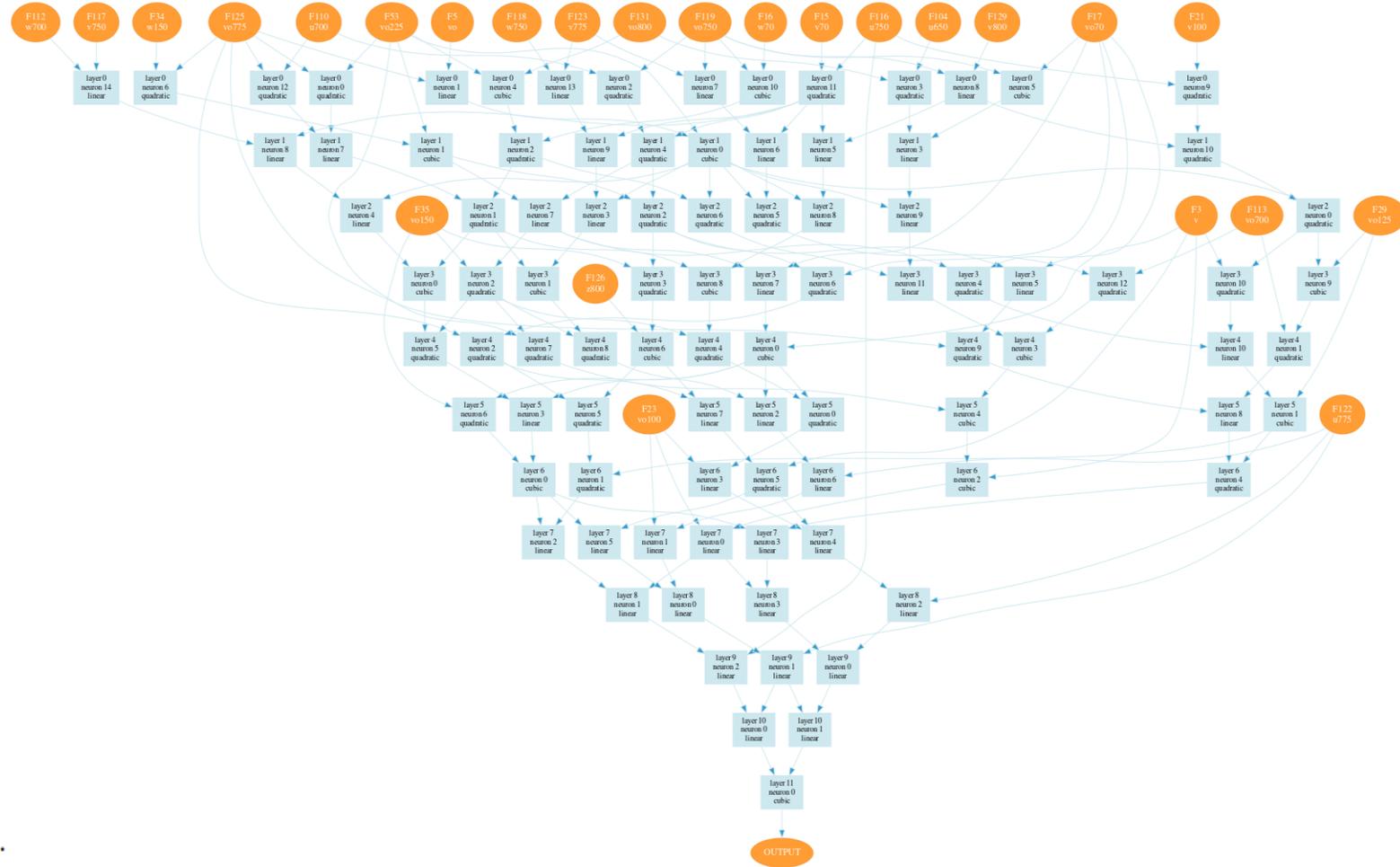


Глубокие нейронные сети строятся на основе метода обучения с учителем, используя пары данных «вертикальные профили метеорологических характеристик – измеряемый параметр seeing» (по дифференциальному дрожанию изображений).

Метеорологические характеристики, выбираются на основе предварительного анализа уравнения для потенциальной энергии турбулентности (адвекция, вертикальный турбулентный поток флуктуаций температуры воздуха $\langle u'w' \rangle$, скорость диссипации ПЭТ)

С использованием метода группового учета аргументов и аппроксимации параметра seeing в виде полиномов Колмогорова-Габора (через метеорологические характеристики):

$$y = W_0 + \sum_{i=1} W_i x_i + \sum_{i=1} \sum_{j=1} W_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} W_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

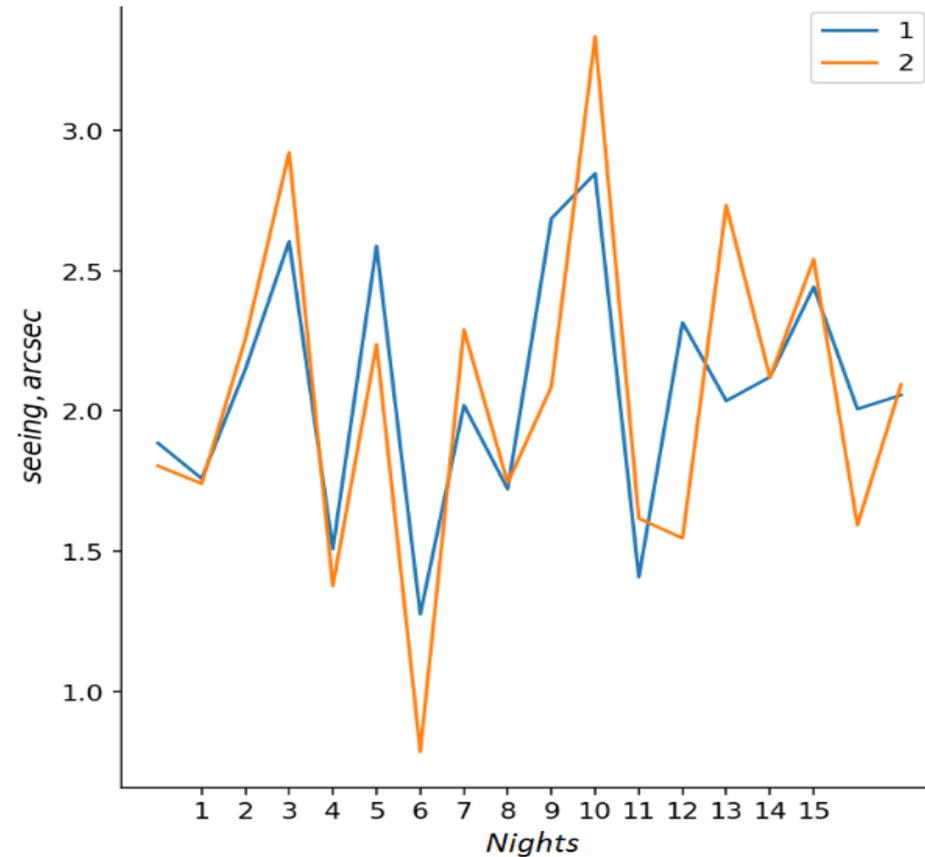


Конфигурация нейронной сети для оценки интегральной оптической турбулентности в месте расположения Саянской солнечной обсерватории



Путем изменения входных данных, можно формировать новые конфигурации нейронных сетей и оценивать насколько те или иные физические процессы влияют на турбулентность.

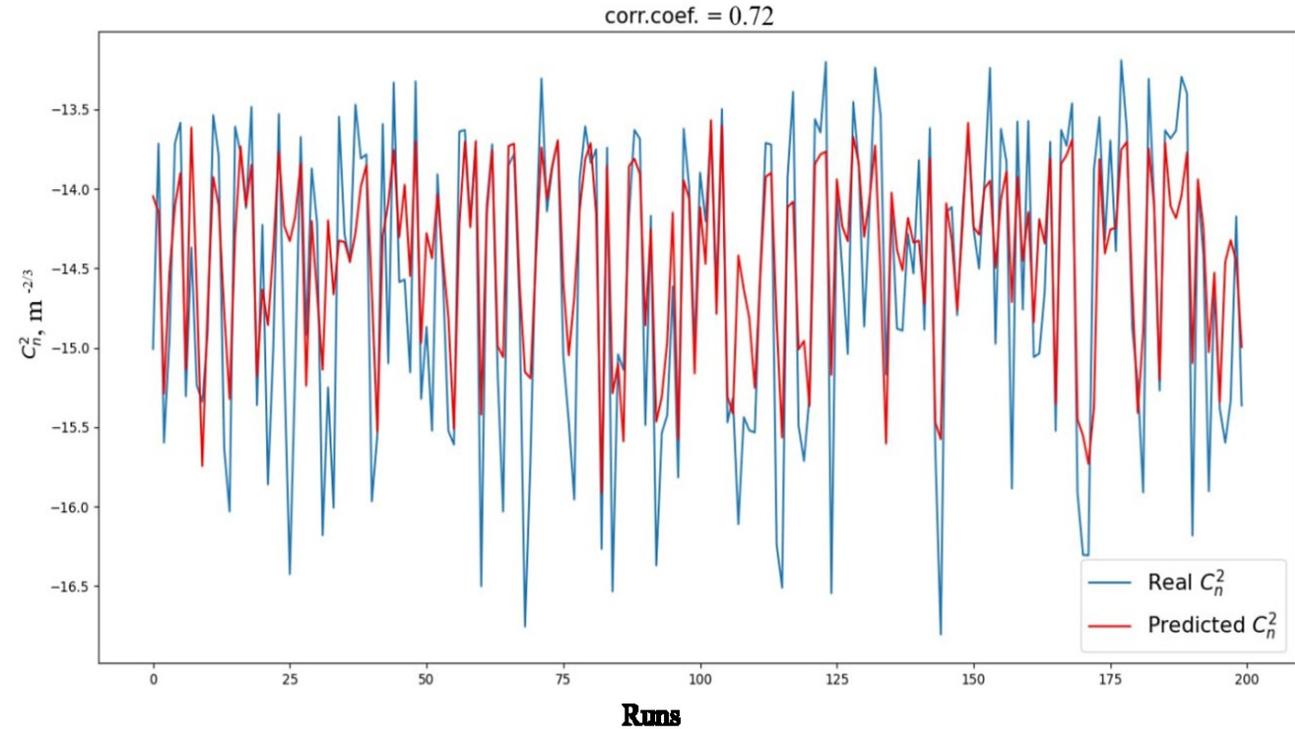
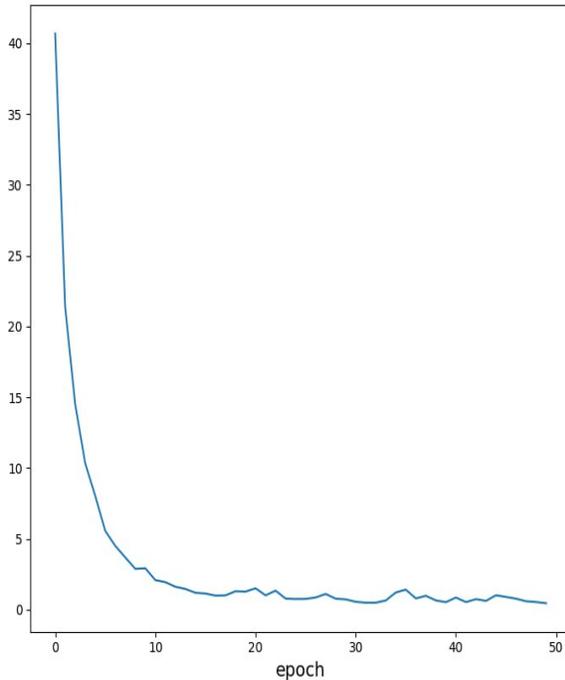
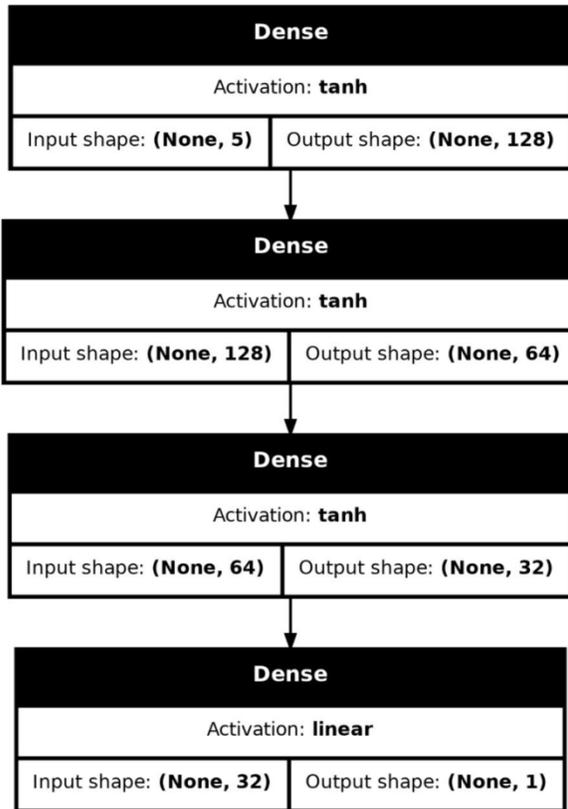
Для ССО важными параметрами являются завихренности атмосферных течений, включая нижний слой, уровни 800, 750 и 225 гПа. Для обсерватории Майданак атмосферные завихренности практически не влияют на мелкомасштабную турбулентность.



Измеренные (синяя линия) и предсказанные нейронной сетью значения seeing в месте расположения Саянской солнечной обсерватории



Построена физически информируемая нейронная сеть для оценки усредненных за 3 минутные интервалы значений интенсивности атмосферной (оптической) турбулентности, БСВТ, Иркутская область

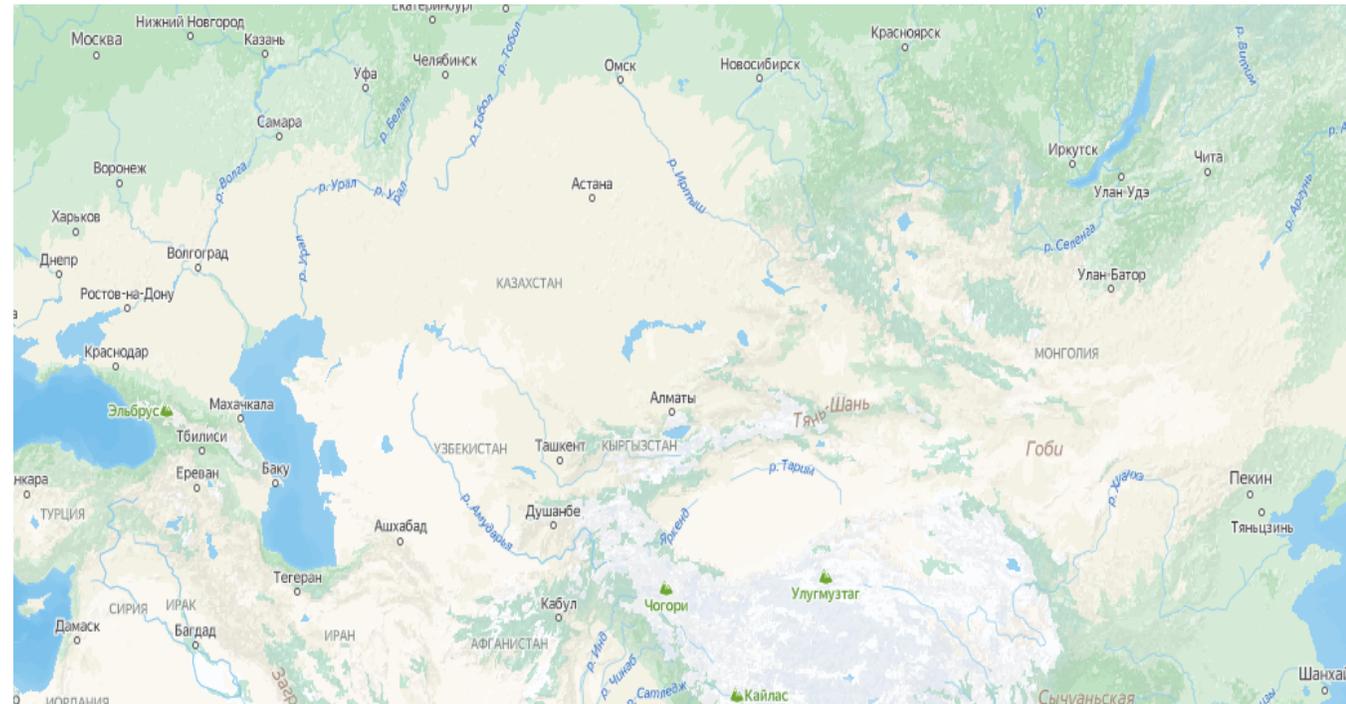
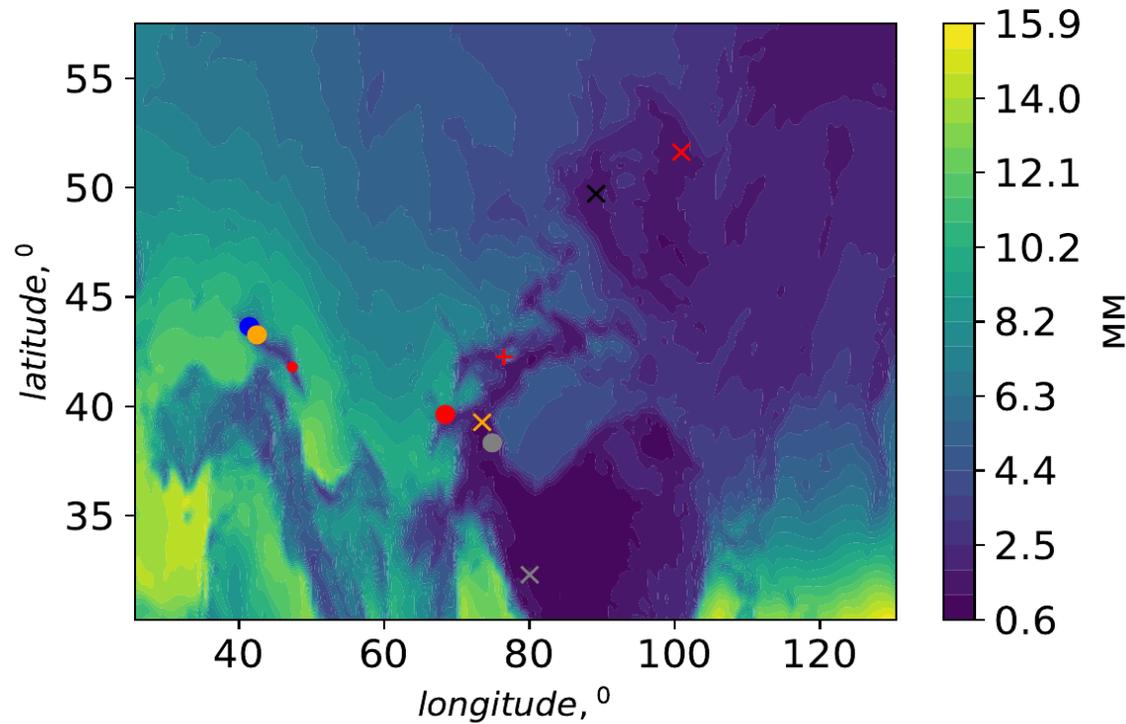


Входные характеристики: скорость ветра, вертикальный градиент скорости ветра, вертикальный градиент потенциальной температуры воздуха, вертикальный турбулентный поток температуры.

Схема нейронной сети, функция потерь и временные изменения интенсивности оптической турбулентности, определенной по данным измерений и нейронной сети



Выбор места под новый ММ телескоп



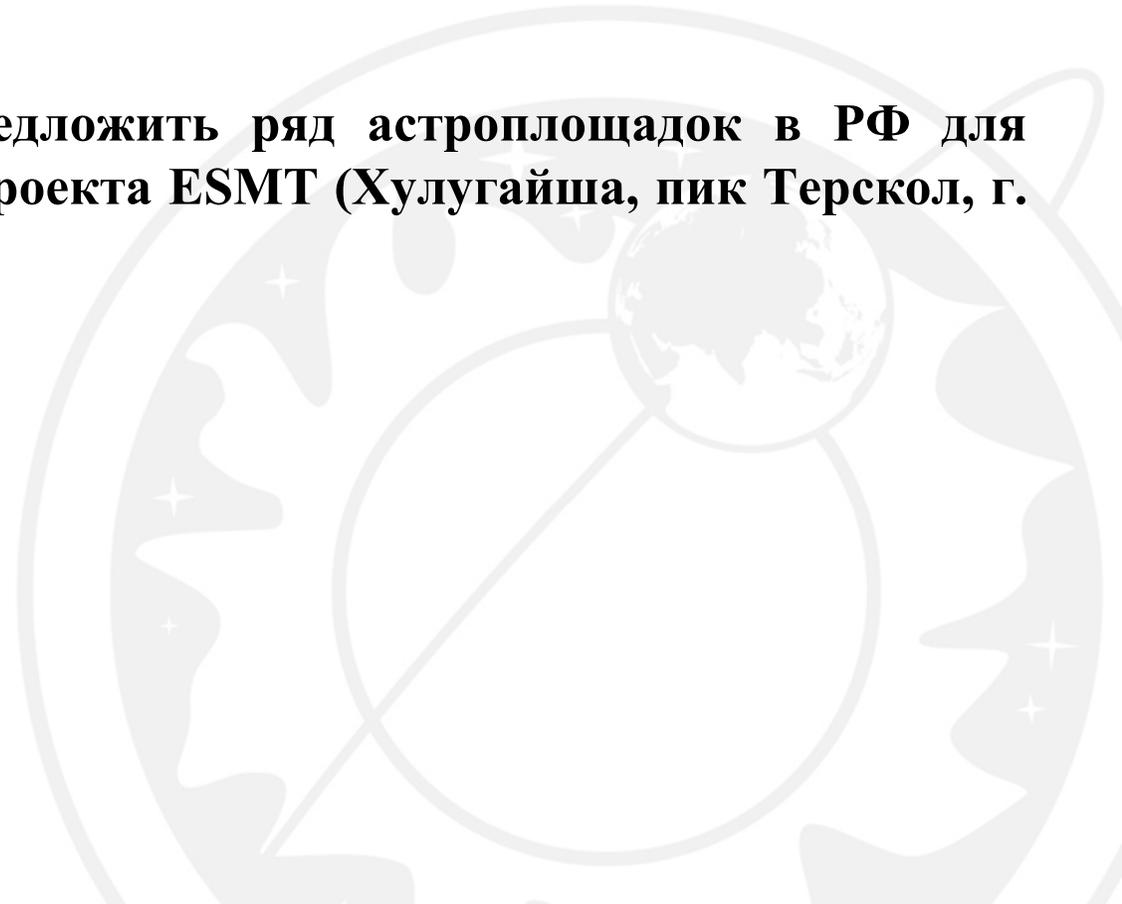
Регион исследования (<https://yandex.ru/maps/>)

Пространственное распределение *расчетных значений осаждемого водяного пара*, полученное по полуэмпирическим данным ре-анализа атмосферы Era-5 в **ночное время**, усредненное с декабря по февраль за период **2013 — 2022 гг.**



Вертикальные профили оптической турбулентности явились основой для разработки системы адаптивной оптики нового Крупного Солнечного Телескопа РФ КСТ-3, одного из крупнейших в мире.

Разработанные подходы и методы позволили предложить ряд астроплощадок в РФ для размещения миллиметрового телескопа в рамках проекта ESMT (Хулугайша, пик Терскол, г. Хорай).





Результаты:

1. Разработан и впервые применен метод измерений вертикальных профилей оптической турбулентности в скрещенных оптических пучках. В сравнении с мировыми аналогами метод обладает более высоким пространственным разрешением за счет учета углового смещения солнечных объектов по небосводу в течение дня. Метод чувствителен к всплескам в интенсивности оптической турбулентности над и под крупномасштабным струйным течением, структура турбулентности в этих слоях носит перемежающийся характер.
2. С применением модели WRF впервые выявлены особенности в мезомасштабной структуре воздушных течений в Байкальском регионе. Показано, что над БСВТ формируется вихревая структура с линейными размерами 10 – 20 км, с которой ассоциируется подавление турбулентности в АПС и улучшение качества солнечных изображений. Применение мезомасштабного моделирования открывает возможности для исследования воздействия многомасштабных атмосферных процессов на структуру мелкомасштабной турбулентности, а также для детализированного описания аномальных атмосферных ситуаций.
3. Найдены конфигурации нейронных сетей для оценки интегральной интенсивности оптической турбулентности (параметра seeing) для мест расположения Саянской солнечной обсерватории и Байкальской Астрофизической Обсерватории. Создана конфигурация физически информируемой нейронной сети, учитывающей физику формирования мелкомасштабной турбулентности (через крупномасштабные вихри и вертикальные турбулентные потоки тепла).



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043,
<https://rscf.ru/project/24-72-10043/>



Сопоставление данных моделирования и измерений по усредненным вариациям интегральной интенсивности оптической турбулентности.

