



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Методы диагностики атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением

с.н.с. к.ф.-м.н. А. Ю. Шиховцев



**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**

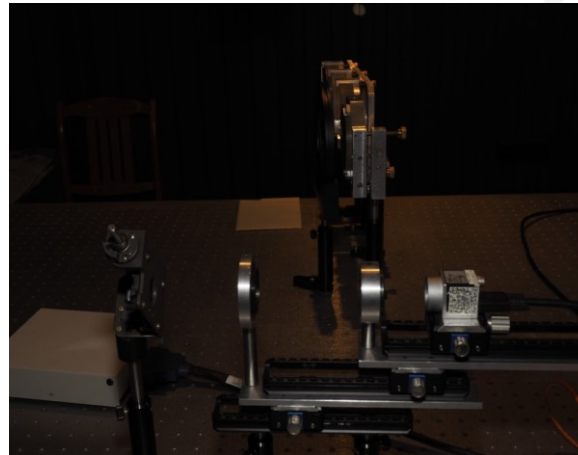


Разработан метод измерений профилей турбулентности

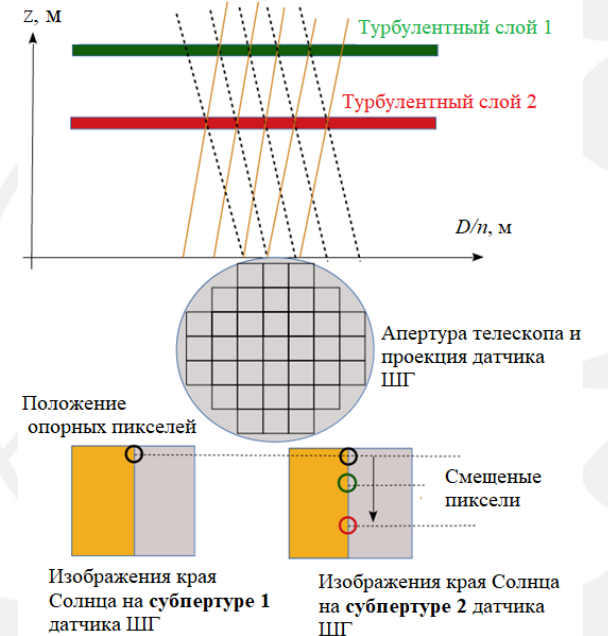


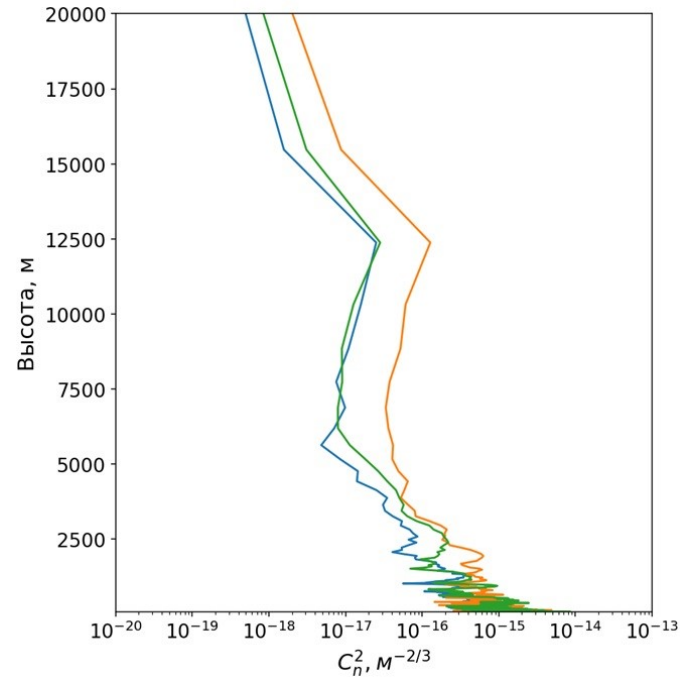
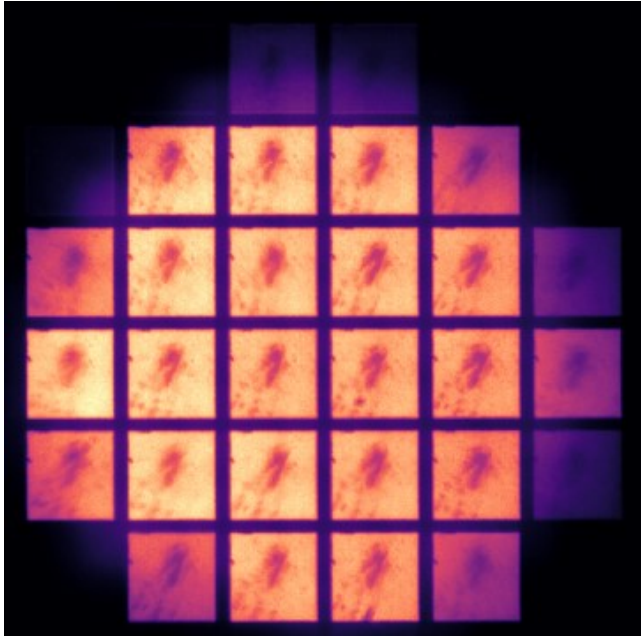
$$C_{xs} = \langle \delta_1(s, 0) \delta_2(s, \theta) \rangle = \sum_{i=1}^M c_{ni} F_x(s, \theta, h_n)$$

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



Датчик ШГ в измерительной
схеме БСВТ





кальная плоскость
эрога перестраивающего
ркала АО БСВТ

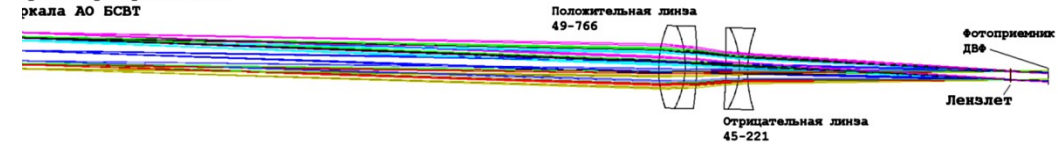


Рисунок . Оптическая схема для второго датчика волнового фронта. Фокальная плоскость второго перестраивающего зеркала АО расположена за делительным кубиком из К8 толщиной 60 мм.

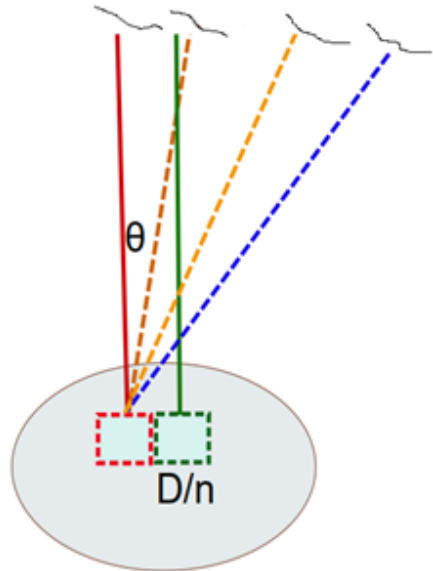
Измеренные вертикальные профили оптической турбулентности, БСВТ

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

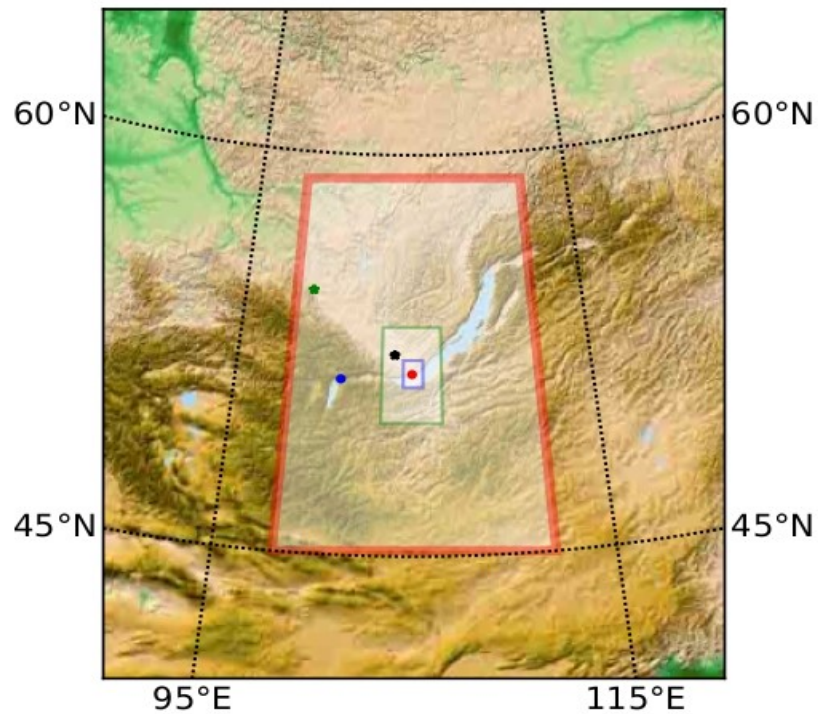
В сравнении с мировыми аналогами возрастает разрешение метода: количество областей с перекрещивающимися оптическими пучками увеличивается за счет учета углового смещения солнечного объекта по небосводу в течение дня.

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.

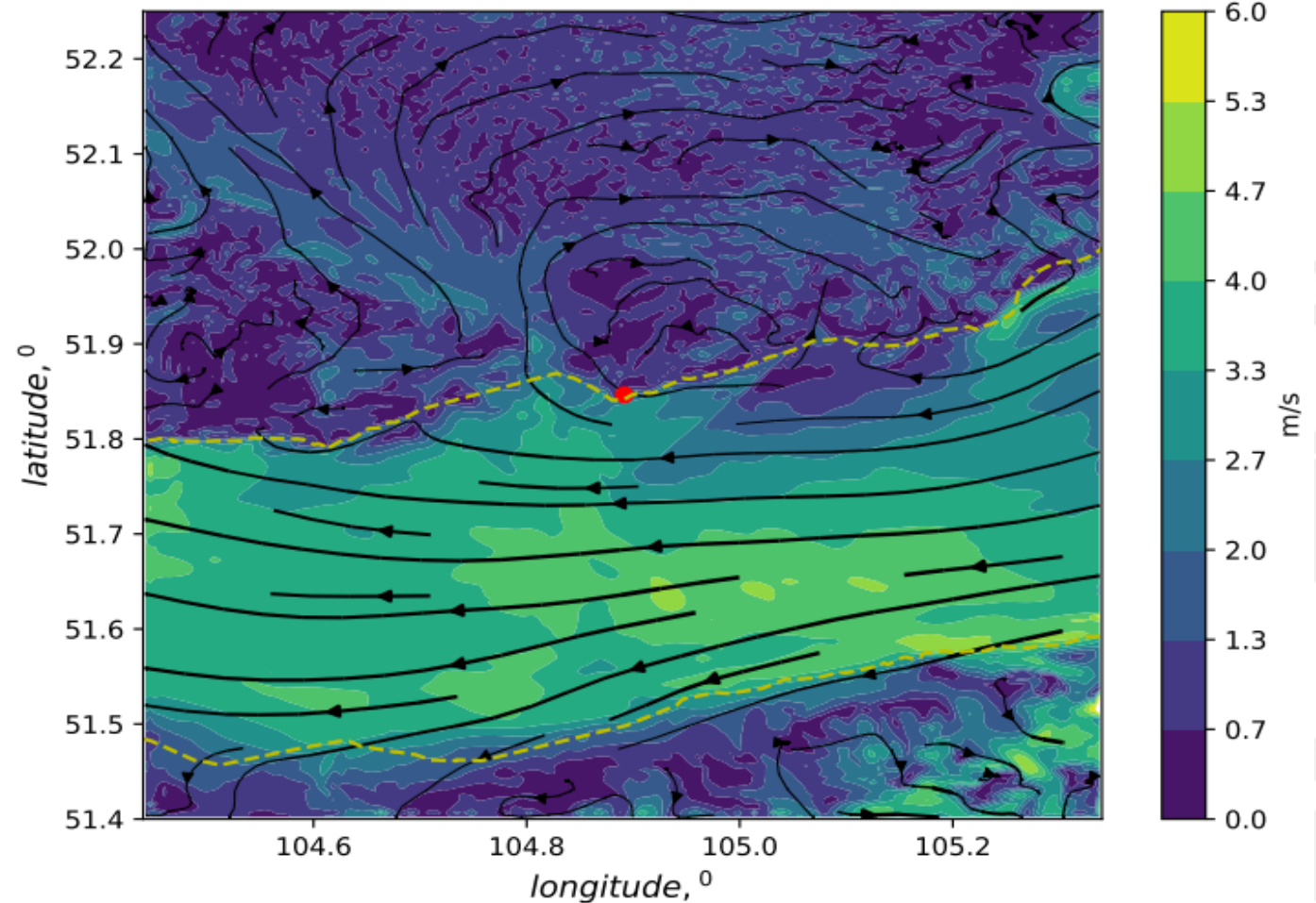


Впервые выполнены исследования атмосферных процессов в приложении к описанию влияния мезомасштабных вихревых структур на генерацию и подавление мелкомасштабной оптической турбулентности.



- BAO
- SSO
- Angarsk
- Nizhneudinsk

Исследуемый регион



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



Впервые с применением модели WRF получены вертикальные профили дневной турбулентности

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

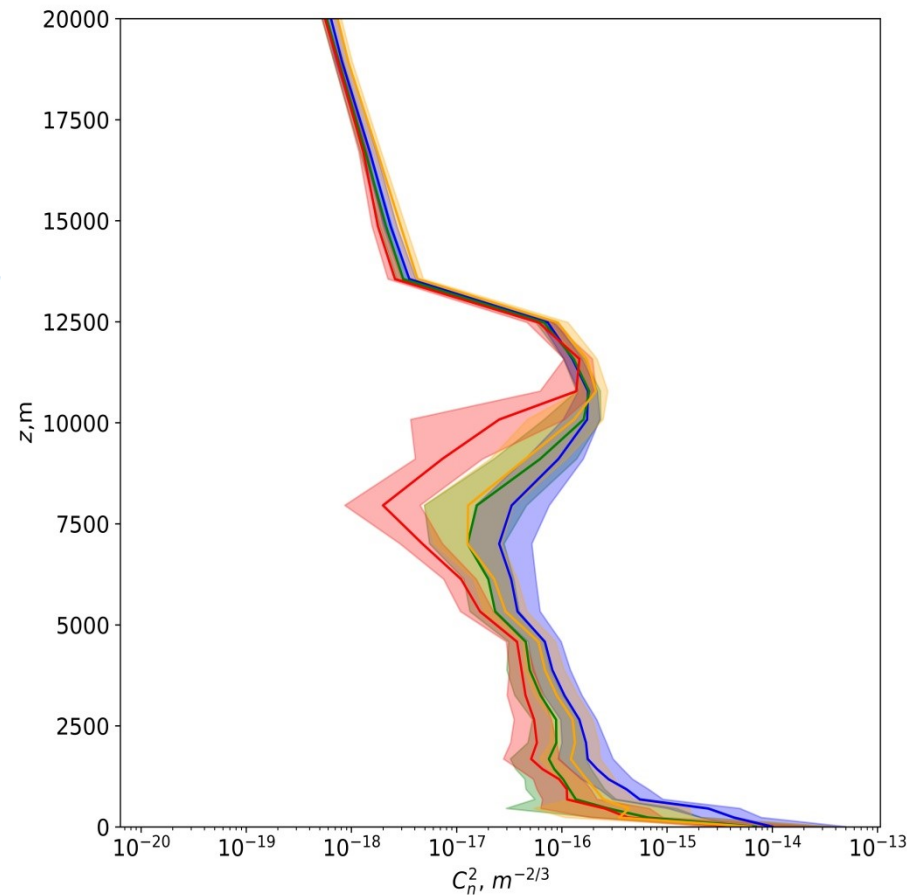
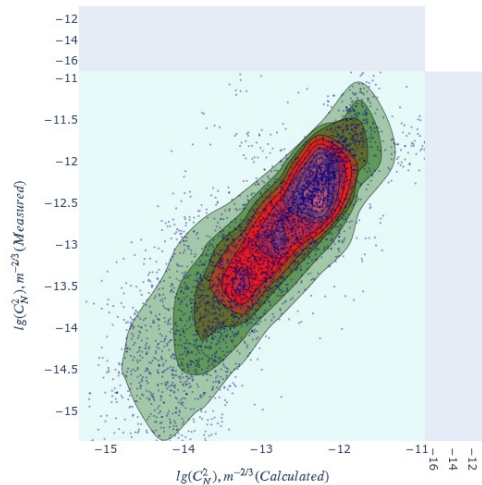
$$C_n^2(z) = aL_0(z)^{4/3}M(z)^2,$$

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

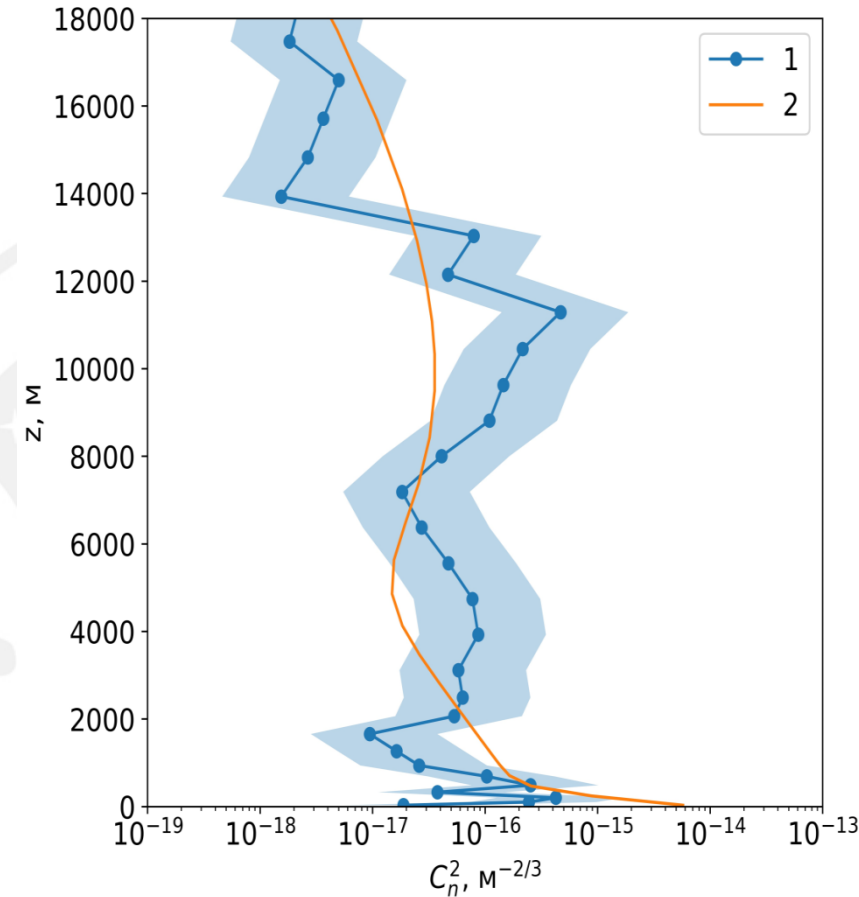
$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \cdot 10^{1.64+42 \cdot S}, & \text{тропосфера} \\ 0.1^{4/3} \cdot 10^{0.506+50 \cdot S}, & \text{стратосфера} \end{cases},$$

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

2D Density Plot



Горизонтальное разрешение 30 км



Горизонтальное разрешение 500 м



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

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



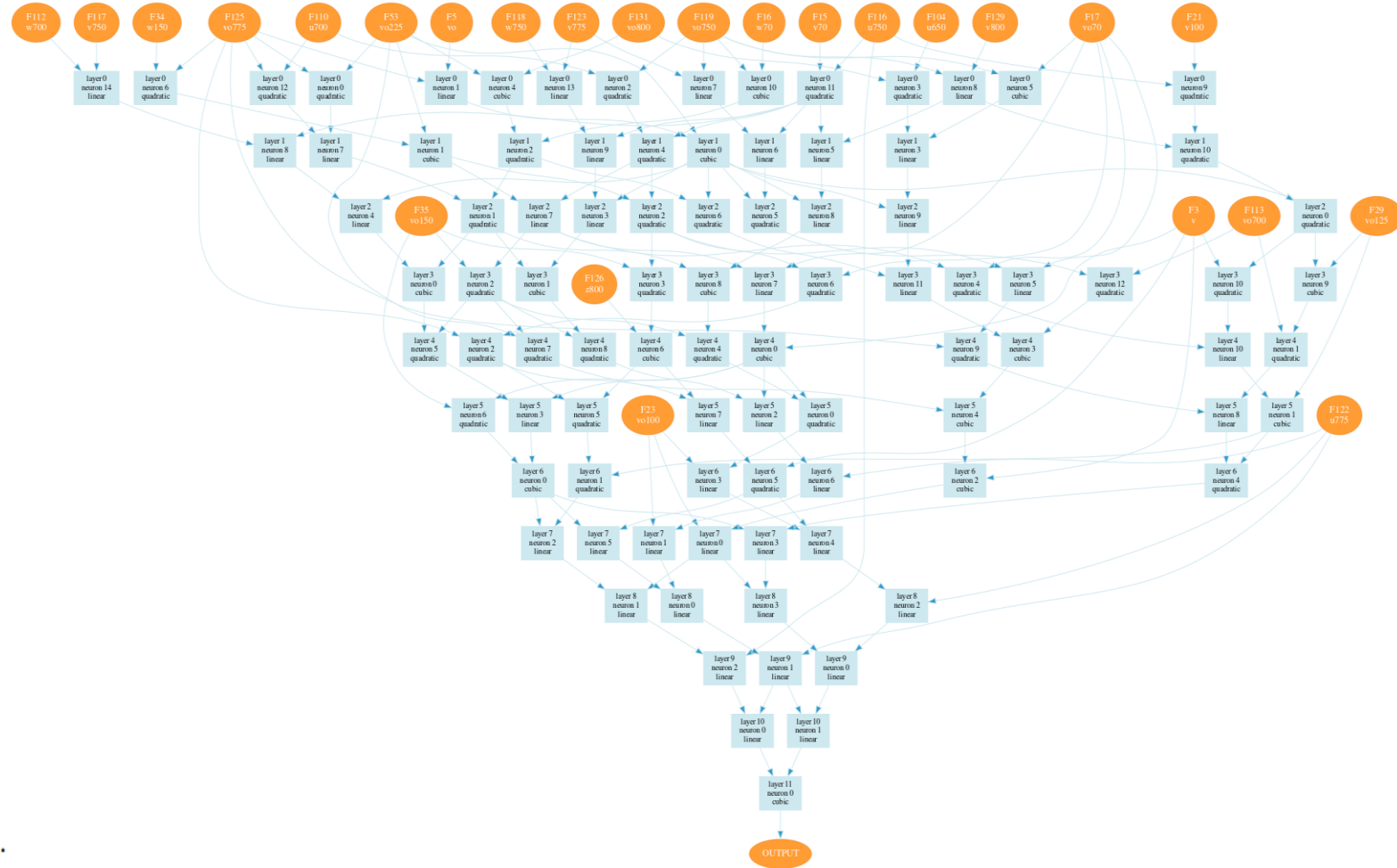


Глубокие нейронные сети строятся на основе метода обучения с учителем, используя пары данных «вертикальные профили метеорологических характеристик – измеряемый параметр seeing» (по дифференциальному дрожанию изображений).

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):

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

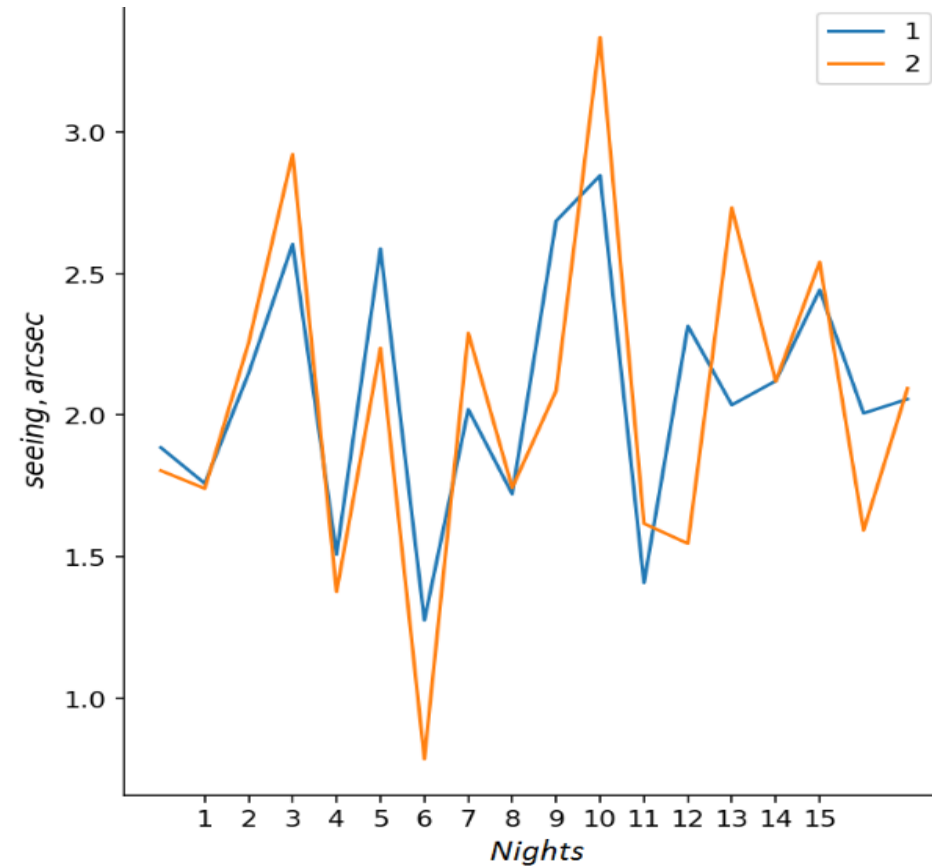


Конфигурация нейронной сети для оценки интегральной оптической турбулентности в месте расположения Саянской солнечной обсерватории



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

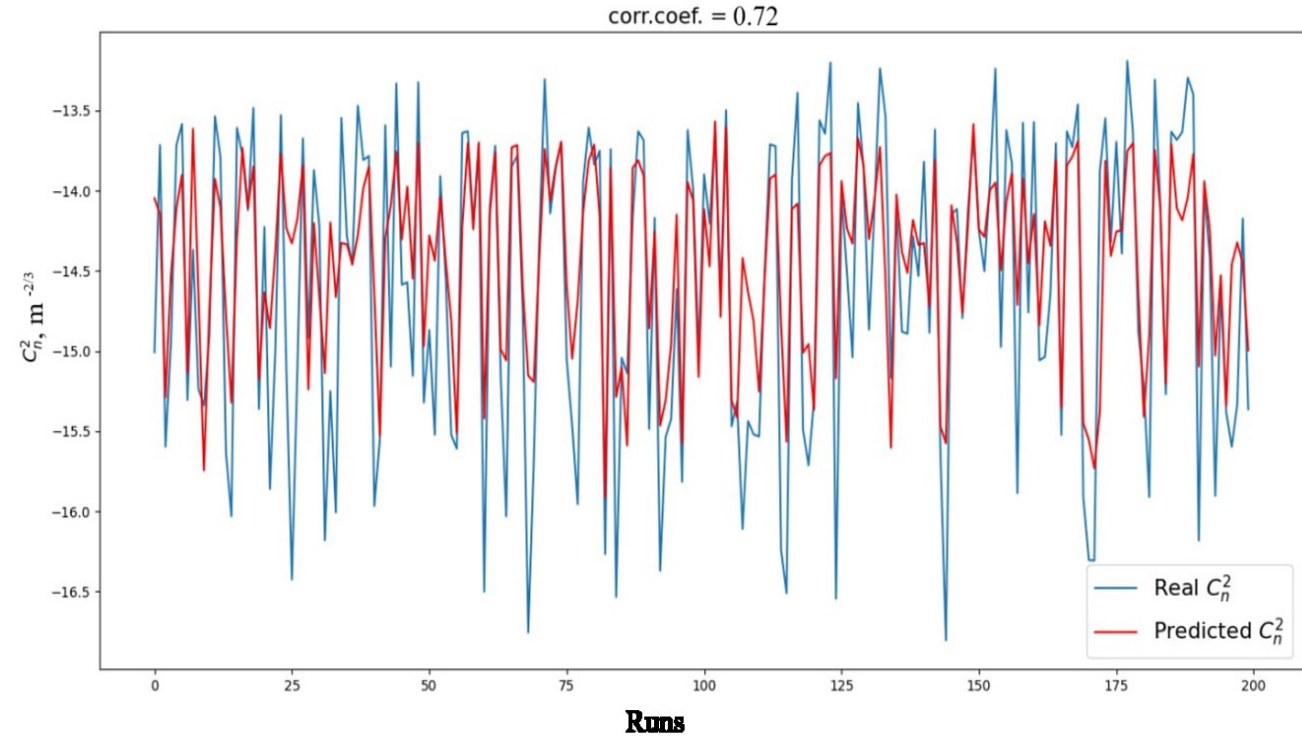
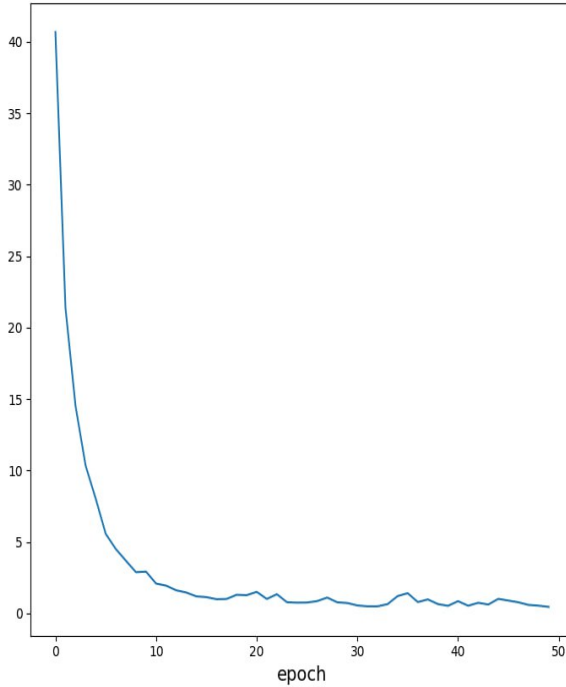
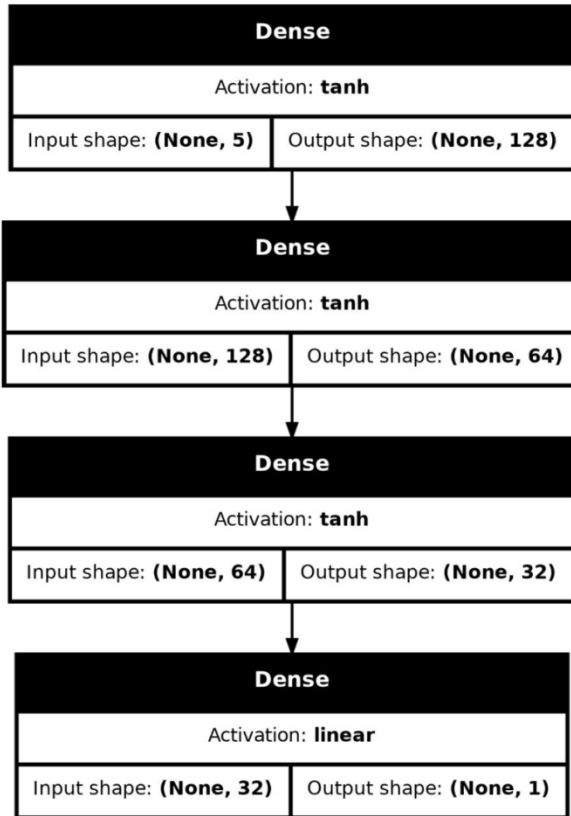
Для ССО важными параметрами являются завихренности атмосферных течений, включая нижний слой, уровни 800, 750 и 225 гПа. Для обсерватории Майданак атмосферные завихренности практически не влияют на мелкомасштабную турбулентность.



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

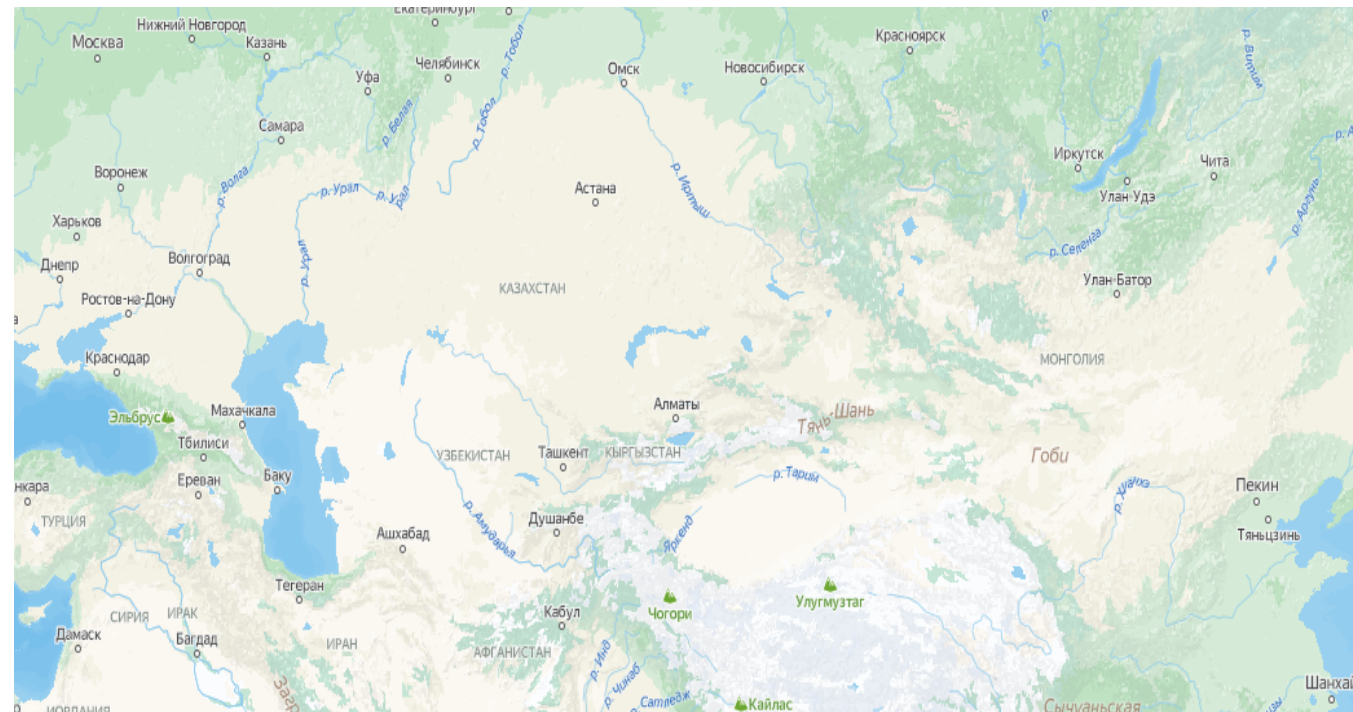
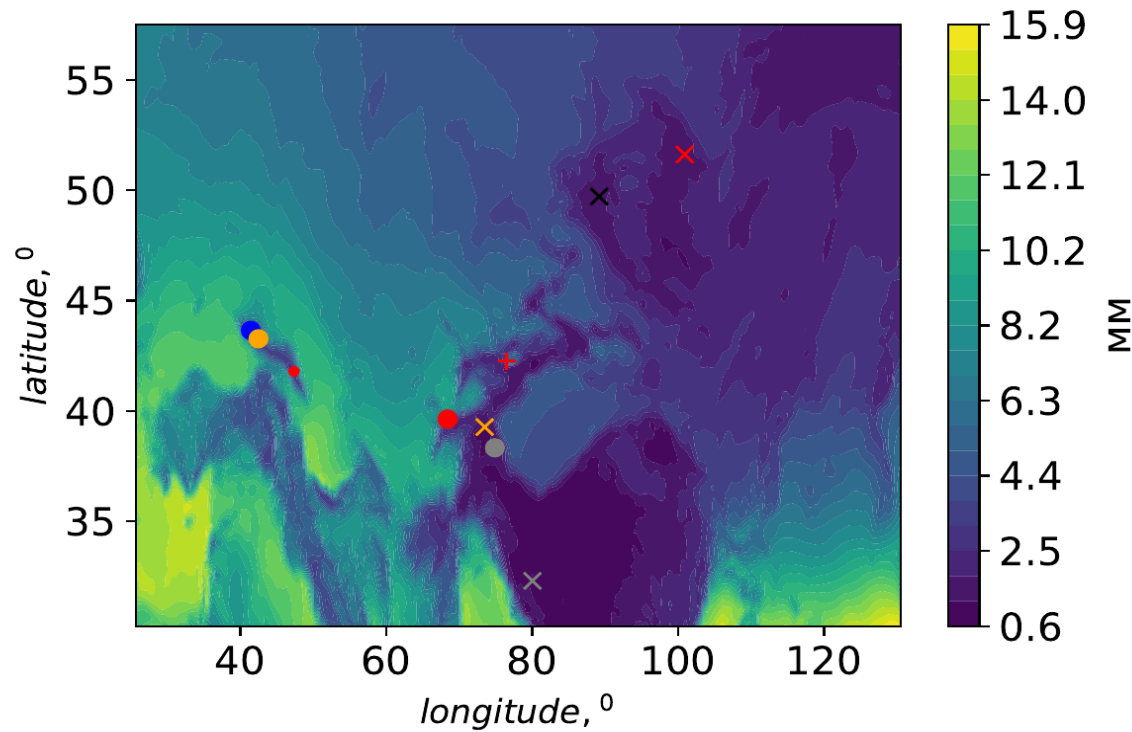


Входные характеристики: скорость ветра, вертикальный градиент скорости ветра, вертикальный градиент потенциальной температуры воздуха, вертикальный турбулентный поток температуры.

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



Выбор места под новый ММ телескоп



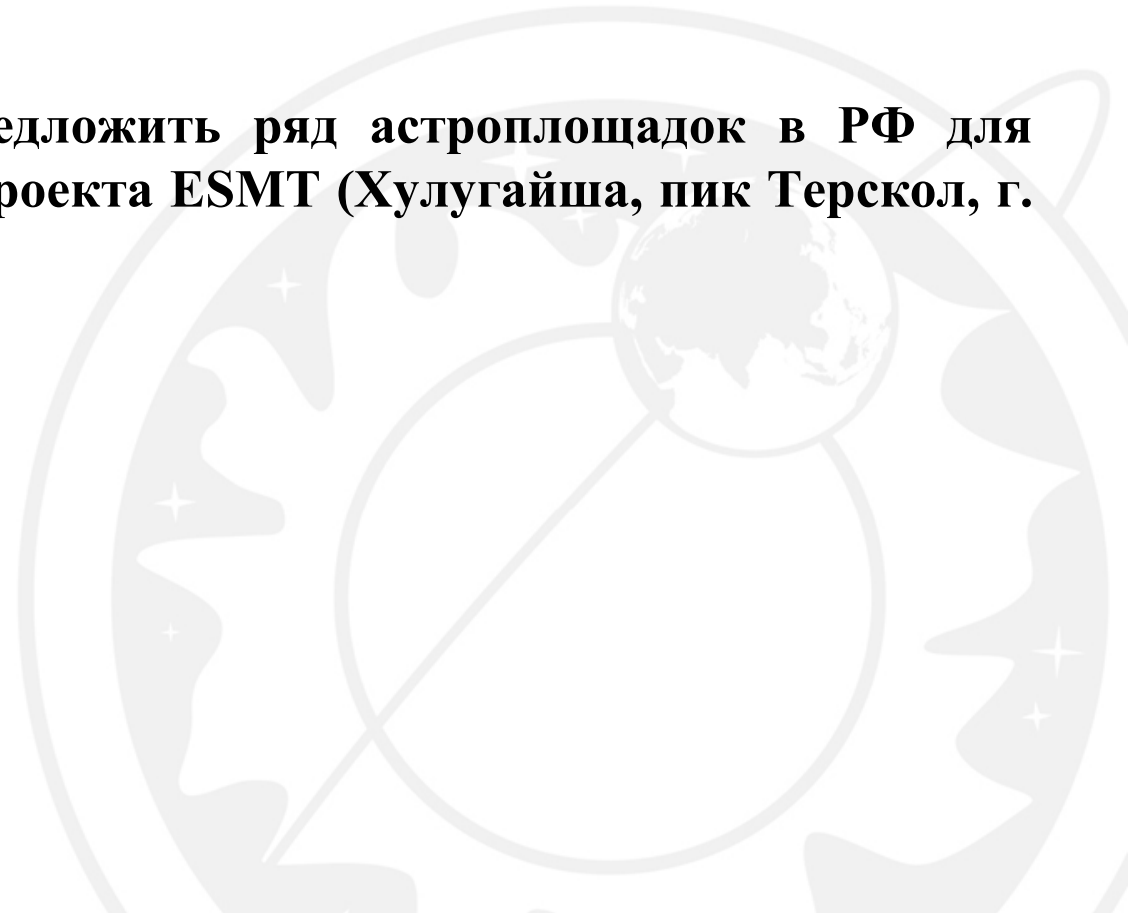
Регион исследования (<https://yandex.ru/maps/>)

Пространственное распределение *расчетных значений* **осажденного 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).





Ссылки на последние опубликованные работы (2022 – 2024 г.)

1. **Shikhovtsev, A.Y.** A Method of Determining Optical Turbulence Characteristics by the Line of Sight of an Astronomical Telescope. *Atmos Ocean Opt* 35, 303–309 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1024856022030149>
2. **Q1-Q2 Shikhovtsev, A.Y.** Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site / *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 76, Issue 3, June 2024, Pages 538–549, <https://doi.org/10.1093/pasj/psae031>
3. **Шиховцев А.Ю.** и др. Формирование искажений волнового фронта на разных высотах в атмосфере. Измерения, выполненные с помощью датчика Шэка—Гартмана. - Солнечно-земная физика. Журнал. Том 8, №2, 2022
4. **Q1 Shikhovtsev, A.Y.; Qing, C.; Kopylov, E.A.; Potanin, S.A.; Kovadlo, P.G.** Vertical Distribution of Optical Turbulence at the Peak Terskol Observatory and Mount Kurapdag. *Remote Sens.* 2024, 16, 2102. <https://doi.org/10.3390/rs16122102>
5. **Q1 Artem Yu. Shikhovtsev, Pavel G. Kovadlo, Alexander V. Kiselev, Maxim V. Eselevich, and Vladimir P. Lukin** Application of Neural Networks to Estimation and Prediction of Seeing at the Large Solar Telescope Site / *PASP* / 2023. 135 014503
6. **Q1 Shikhovtsev, A.Y.; Kovadlo, P.G.; Lezhenin, A.A.; Gradov, V.S.; Zaiko, P.O.; Khitrykau, M.A.; Kirichenko, K.E.; Driga, M.B.; Kiselev, A.V.; Russkikh, I.V.** Simulating Atmospheric Characteristics and Daytime Astronomical Seeing Using Weather Research and Forecasting Model. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6354. <https://doi.org/10.3390/app13106354>
7. **Q1 Shikhovtsev, A.Y.; Kovadlo, P.G.; Khaikin, V.B.; Nosov, V.V.; Lukin, V.P.; Nosov, E.V.; Torgaev, A.V.; Kiselev, A.V.; Shikhovtsev, M.Y.** Atmospheric Conditions within Big Telescope Alt-Azimuthal Region and Possibilities of Astronomical Observations. *Remote Sens.* 2022, 14, 1833. <https://doi.org/10.3390/rs14081833>
8. **Q1 Shikhovtsev, A.Y.; Kovadlo, P.G.; Khaikin, V.B.; Kiselev, A.V.** Precipitable Water Vapor and Fractional Clear Sky Statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region. *Remote Sens.* 2022, 14, 6221. <https://doi.org/10.3390/rs14246221>
9. **Q1 Bolbasova L. A., Shikhovtsev A. Yu., Ermakov S. A.** Statistics of precipitable water vapour above the sites of the 6-m Big Telescope Alt-azimuthal and new 3-m Large Solar Telescope using ERA5 data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 520, Issue 3, April 2023, Pages 4336–4344, <https://doi.org/10.1093/mnras/stad300>
10. **Q1 Shikhovtsev, AY, Kovadlo, PG, Lezhenin, AA, Korobov, OA, Kiselev, AV, Russkikh, IV, Kolobov, DY & Shikhovtsev, MY** 2023, 'Influence of Atmospheric Flow Structure on Optical Turbulence Characteristics', *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, 1282. <https://doi.org/10.3390/app13031282>
11. **Q2 Shikhovtsev, A.Y.; Kovadlo, P.G.; Kopylov, E.A.; Ibrahimov, M.A.; Ehgamberdiev, S.A.; Tillayev, Y.A.** Energy Spectra of Atmospheric Turbulence for Calculating C_{2n} Parameter. I. Maidanak and Sufra Observatories in Uzbekistan. *Atmosphere* 2021, 12, 1614.

Итого за 2022 - 2024: 2 публикации с одним автором, 10 публикаций Q1-Q2 и 9 K1 (18 публикаций Q1-Q2 за 2019 – 2024)

Специальные выпуски:

A. Q1 Kovadlo P., Shikhovtsev A. Advanced Observation for Geophysics, Climatology and Astronomy) / *Applied Sciences*. – 2023.

B. Q2 Qian X., Shikhovtsev A., Yao Y., Kovadlo P. Открытый специальный выпуск «Modern Advances in Optical, Millimeter and Submillimeter Astronomy» / *Photonics*. - 2024 – 2025.



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. Созданы конфигурации 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

Работы поддержаны грантом Президента РФ МК-444.2021.4, РФФ 22-29-01137, РФФ 22-72-00049, РФФ 19-79-00061.



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

