УДК 520.16, 520.18 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-297

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АТМОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРИЛОЖЕНИИ К НАЗЕМНЫМ АСТРОНОМИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПАМ

А.Ю. Шиховцев[1], П.Г. Ковадло[1], А.В. Киселев[1], А.А. Леженин[2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
Ashikhovtsev@iszf.irk.ru, kovadlo2006@rambler.ru, kiselev@iszf.irk.ru
[2]Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия,
lezhenin@ommfao.sscc.ru

METHODS FOR ESTIMATING ATMOSPHERIC CHARACTERISTICS AS APPLIED TO GROUND-BASED ASTRONOMICAL TELESCOPES

A.Yu. Shikhovtsev[1], P.G. Kovadlo[1], A.V. Kiselev[1], A.A. Lezhenin[2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
Ashikhovtsev@iszf.irk.ru, kovadlo2006@rambler.ru, kiselev@iszf.irk.ru
[2]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,
lezhenin@ommfao.sscc.ru

Аннотация. В настоящем докладе обсуждаются методы, используемые для оценки ряда атмосферных характеристик релевантных для астрономических наблюдений. Рассматриваются возможности повышения временного и пространственного разрешений при восстановлении полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха. Высокая пространственная и временная детализация в метеорологических данных дает возможность параметризировать атмосферную мелкомасштабную турбулентность также с более высоким разрешением. Приводятся некоторые результаты по адаптации и применению мезомасштабной модели WRF в пределах Байкальского региона (с центром над Байкальской Астрофизической Обсерваторией). Оценены вертикальные профили оптической турбулентности над Большим солнечным вакуумным телескопом, определяющие амплитуды оптических искажений, формируемых на разных высотах в атмосфере.

Ключевые слова: оптическая турбулентность, seeing, WRF, Era-5 реанализ

Abstract. This report discusses methods used to estimate atmospheric characteristics relevant to astronomical observations. The possibilities for increasing temporal and spatial resolutions when reconstructing fields of wind speed, temperature and air humidity are considered. High spatial and temporal resolution in meteorological data makes it possible to parameterize atmospheric small-scale turbulence with higher resolution too. We present some results on the adaptation and application of the mesoscale WRF model within the Baikal region (centered over the Baikal Astrophysical Observatory). We also estimate vertical profiles of optical turbulence over a Large Solar Vacuum Telescope, which determine the amplitudes of optical distortions formed at different atmospheric heights.

Keywords: optical turbulence, seeing, WRF, Era-5 reanalysis

ВВЕДЕНИЕ

Для планирования наблюдательного времени на астрономических телескопах наземного базирования одной из задач является развитие методов оценки атмосферных характеристик, определяющих возможности наблюдений [Ботыгина, 2013; Корнилов, 2009; Shikhovtsev, 2019]. К ключевым таким характеристикам относят вертикальные профили оптической турбулентности (ОТ), а также параметр seeing, который определяет угловое разрешение. Эти характеристики, во многом, определяют технические параметры систем адаптивной оптики [Лукин, 2024].

В настоящем докладе обсуждаются методы оценки характеристик оптической турбулентности, увеличения пространственного и временного разрешения, а также пути повышения точности оценки и предсказания интегрального параметра seeing с применением нейронных сетей. В частности, для оценки вертикальных профилей ОТ предлагается использовать градиентный метод в комбинации с минимизацией СКО между измеренными и модельными значениями параметра seeing и изопланатического угла. Для повышения разрешения профили ОТ могут быть рассчитаны на основе данных модели WRF с высоким горизонтальным и временным разрешением.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA-5 С ОГРАНИЧЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Для определения устойчивых вертикальных профилей оптической турбулентности над Большим солнечным вакуумным телескопом (БСВТ) были использованы данные ре-анализа Era-5. С применением градиентного метода [Shikhovtsev, 2023] и данных о скорости ветра и температуре воздуха на различных уровнях давления получены вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ для разных сезонов года (рис.1) [Shikhovtsev, 2024].

Полученные вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ демонстрируют быстрое уменьшение с высотой структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 с высотой. Значения C_n^2 получены на 27 высотных уровнях в слое от 5 м до 21630 м. Эти профили могут быть использованы как референсные профили оптической турбулентности над БСВТ в целях оптимизации параметров макета системы адаптивной оптики.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ WRF

С целью получения вертикальных профилей оптической турбулентности с более высоким пространственным разрешением над БСВТ, мы адаптировали мезомасштабную модель WRF для Байкальского региона. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным модели WRF (синяя кривая) и по модели Хавнагеля-Волли (оранжевая кривая) показаны на рис. 2.

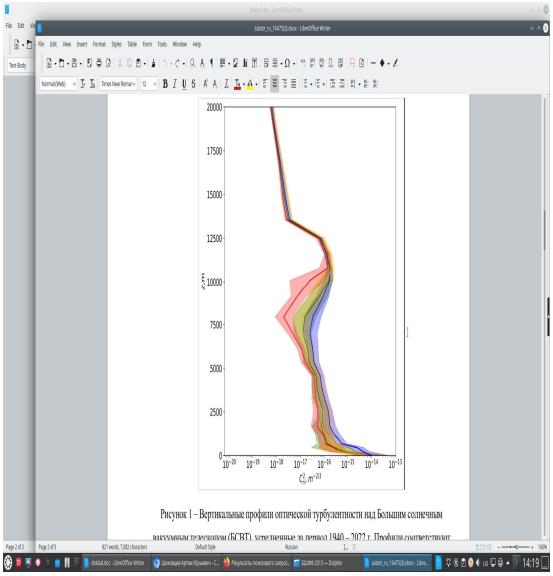

Рис. 1. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным ре-анализа Era-5 для разных сезонов года. Синяя кривая соответствует зиме, зеленая — весне, красная — лету и оранжевая — осени

В отличие от данных ре-анализа Era-5, расчет C_n^2 выполнялся для 44 высот, с наилучшим разрешением в нижних слоях атмосферы. Число высотных уровней до 3100 м составило 12. В более высоких слоях атмосферы моделирование проводилось до высоты 30 800 м.

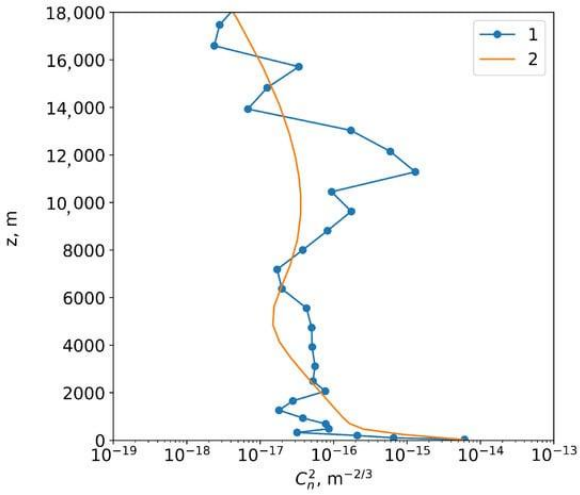

Рис. 2. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным модели WRF (синяя кривая) и по модели Хавнагеля-Волли (оранжевая кривая)

Анализ рис. 2 показывает, что вертикальный профиль оптической турбулентности содержит ряд атмосферных слоев с повышенной интенсивностью оптических флуктуаций. Изрезанный характер вертикального профиля оптической турбулентности наблюдается не только в нижнем, т.н. атмосферном пограничном слое, но и под тропопаузой. Необходимо подчеркнуть, что градиентная модель подразумевает, что значения C_n^2 при увеличении вертикальных градиентов скорости ветра и внешнего масштаба турбулентности должны также возрастать. В то же время, экспериментальные данные показывают, что интенсивность оптической турбулентности C_n^2 уменьшается на фоне развития мезомасштабных вихревых структур в нижнем 500–700 м слое атмосферы (рис. 3)

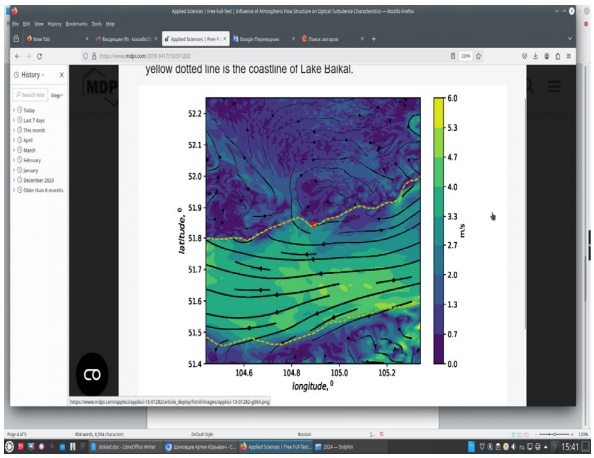

Рис. 3. Поле скорости ветра вокруг БСВТ (красный маркер) и мезомасштабная вихревая структура

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Важнейшей характеристикой вертикальных профилей оптической турбулентности является интеграл от структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха по высоте. Этот интеграл определяет качество изображения, а именно, параметр seeing, измеряемых в угловых секундах. Данные измерений оптических искажений, как и оценки интенсивности оптической турбулентности, полученные по результатам моделирования могут быть использованы для задания дополнительных входных переменных при обучении нейронных сетей для диагностики и прогнозирования характеристик качества астрономического изображения [Shikhovtsev, 2023; Bolbasova, 2021]. Фактически, использование характеристик мезомасштабного вихря, его завихренности, геометрических характеристик, должно учитывать подавление мелкомасштабной турбулентности в крупномасштабном вихревом течении и повышать точность предсказания параметра seeing.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем докладе обсуждаются методы оценки вертикальных профилей оптической

турбулентности и одной из важнейших характеристик, seeing. Показано, что вертикальные профили оптической турбулентности могут быть восстановлены по данным реанализа Era-5 с минимизацией СКО между измеренными и расчетными значениями seeing. Увеличение пространственного разрешения может быть достигнуто путем использования мезомасштабной модели WRF.

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп http://ckp-rf.ru/usu/200615/. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А. и др. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

Корнилов В., Ильясов С., Возякова О. и др. Измерения оптической турбулентности в свободной атмосфере над горой Майданак в 2005–2007 гг. // Письма в Астроном. журн. 2009. Т. 35, № 8. С. 606–614.

Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V. Temporal variations of the turbulence profiles at the Sayan Solar Observatory site // Atmosphere. 2019. V. 10, N 9. P. 499.

Лукин В.П., Лукин И.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 1. С. 68–80.

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A. et al. Simulating Atmospheric Characteristics and Daytime Astronomical Seeing Using Weather Research and Forecasting Model // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 6354.

Shikhovtsev A.Yu. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2024. psae031.

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Kiselev A.V. et al. Application of Neural Networks to Estimation and Prediction of Seeing at the Large Solar Telescope Site // PASP. 2023. V. 135. 014503.

Bolbasova L.A., Andrakhanov A.A., Shikhovtsev A.Y. The application of machine learning to predictions of optical turbulence in the surface layer at Baikal Astrophysical Observatory // MNRAS. 2021. V. 504, iss. 4. P. 6008–6017.