

Физически-информируемые нейронные сети для оценки интенсивности атмосферной оптической турбулентности*

А.Ю. Шиховцев¹, А.В. Киселев¹, П.Г. Ковадло¹

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Многие нейронные сети строятся по принципу «черного ящика», когда внутренняя структура модели не дает возможностей для физической интерпретации полученной модели. В настоящей работе демонстрируются методические основы для преодоления этой проблемы путем построения глубокой нейронной сети с учетом физических ограничений, налагаемых на функцию потерь. В частности, предложена и анализируется физически информируемая глубокая нейронная сеть, предсказывающая вариации трехминутных значений интенсивности оптической турбулентности в приземном слое атмосферы для места расположения Большого солнечного вакуумного телескопа. Модель нейронной сети позволяет оценивать интенсивность оптической турбулентности по средним метеорологическим характеристикам, а также учитывает вариации сглаженных во времени локальных величин внешнего масштаба турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла.

Ключевые слова: оптическая турбулентность, машинное обучение, физически информируемые нейронные сети.

Введение

В последнее десятилетие значимое развитие получили технологии машинного обучения и нейронные сети, применяемые для решения различных задач [1–3]. Технологии машинного обучения используются в астропогодных и астроклиматических исследованиях [3], хотя и в весьма ограниченном объеме. Ранее глубокие нейронные сети были построены нами для оценки углового атмосферного разрешения (параметра, в англоязычной литературе обозначаемого как seeing) для Саянской солнечной обсерватории и Астрономической обсерватории Майдаанак. Отличительная особенность моделирования временных вариаций углового атмосферного разрешения для этих обсерваторий состоит в том, что нейронные сети обучались на длинных временных рядах. В частности, для Саянской солнечной обсерватории рассматривался период измерений, выполненных в ночное время с помощью дифференциального монитора дрожания изображения (известного как DIMM) с февраля 2012 г. по июль 2015 г., а для Астрономической обсерватории Майдаанак использовался еще более длинный ряд прямых измерений: с 1996 по 2003 г. и с 2018 по 2022 г. [4, 5].

Даже несмотря на то, что выбор входных переменных, задействованных в обучении, – это один из ключевых шагов для построения работоспособной нейронной сети и должен основываться на физических соображениях, уравнениях или их системе, многослойные нейронные сети имеют существенный недостаток. Модели таких сетей – это, по существу, «черный ящик». Их обучение опирается не сколько на научные теории и физику, а в основном на большие объемы данных и представляют собой результат их статистической обработки. Как отдельное направление, разрабатываемое и совершенствуемое в мире в последние годы, физически-информируемые нейронные сети (ФИНС) фокусируются на использовании конкретных уравнений, физических закономерностей в процессе обучения. В частности, функция потерь представляется более сложным образом, в виде суммы некоторого статистического члена, аналогично обычной нейронной сети, и аддитивной части, определяемой конкретным физическим соотношением, граничными и начальными условиями рассматриваемой физической задачи.

Одной из интересных задач, при решении которой применялась ФИНС, является оценка турбулентных потоков в окрестностях границы вода – воздух. В частности, отметим, что в работе [6] предложена новая схема параметризации турбулентного потока тепла, основанная на обученной ФИНС по данным измерений атмосферных характеристик. Авторами показано, что применение ФИНС позволяет существенно уменьшить среднее квадратическое отклонение потоков тепла, ~ 50%, в сравнении с классическими подходами. Также сравнительно более высокую точность

* Создание, программная реализация и анализ моделей физически информируемых нейронных сетей, предсказывающих интенсивность оптической турбулентности в приземном слое атмосферы, выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043 (<https://rscf.ru/project/24-72-10043/>) «Разработка методов диагностики характеристик нижней атмосферы с высоким разрешением в приложении к наземным астрономическим телескопам».