УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-43
ORCID: 0009-0008-7369-5831

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДА ГАРСИЯ—БАЛЧА И ВАРИАЦИОННОЙ КВАНТОВОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПИКОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

И.И. Давыденков, В.А. Ожередов

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, davydenkov.ii@phystech.edu

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GARCIA—BALCH METHOD AND A VARIATIONAL QUANTUM NEURAL MODEL FOR SHORT-TERM FORECASTING OF SOLAR PROTON EVENT PEAK INTENSITY

I.I. Davydenkov,V.A. Ozheredov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, davydenkov.ii@phystech.edu

Аннотация. Рассмотрена задача оперативного прогнозирования пиковой интенсивности солнечных протонных событий с энергией выше 10 МэВ. Целевой переменной служит десятичный логарифм пикового протонного потока. В качестве физически обоснованного опорного времени используется момент максимума мягкого рентгеновского излучения вспышки, определяемый по ближайшему событию в базе HEK. Признаковое пространство включает параметры GOES XRS, характеристики коронального выброса массы, индикаторы ударных процессов и предвестниковые сигналы ACE EPAM. На хронологической тестовой выборке вариационная квантовая схема достигла средней абсолютной ошибки десятичного логарифма 0.523 и среднеквадратичной ошибки десятичного логарифма 0.653, что лучше прокси-подхода Гарсия—Балча и регуляризованной линейной регрессии Ridge.

Ключевые слова: солнечные протонные события, мягкое рентгеновское излучение, корональный выброс массы, квантовое машинное обучение, космическая погода.

Abstract. We address short-term forecasting of peak intensity of solar energetic proton events above 10 MeV. The target variable is the decimal logarithm of NOAA peak proton flux. A physically grounded reference time is defined as the soft X-ray peak of the nearest associated flare identified in HEK. The feature space combines GOES XRS descriptors, coronal mass ejection parameters, shock-related indicators, and ACE EPAM precursor channels. On the chronological holdout set, the variational quantum circuit achieved a mean absolute error in decimal logarithmic space of 0.523 and a root mean square error in decimal logarithmic space of 0.653, outperforming both the Garcia—Balch proxy and Ridge regression baselines.

Keywords: solar energetic proton events, soft X-ray peak, coronal mass ejection, quantum machine learning, space weather.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем исследовании рассмотрена задача оперативного прогноза пиковой интенсивности солнечных протонных событий (Solar Energetic Particle, SEP) с энергией частиц выше 10 МэВ. В качестве целевой переменной использован десятичный логарифм пикового протонного потока по данным NOAA. Принципиальной особенностью постановки является физически детерминированный выбор опорного времени: в качестве T_ref принят момент максимума мягкого рентгеновского излучения вспышки (SXR peak), идентифицированный по ближайшему релевантному событию из базы HEK.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Признаковое пространство формировалось исключительно из физически интерпретируемых параметров, доступных к моменту SXR-пика: характеристик GOES/XRS (класс вспышки, пиковый поток, флуенс), параметров коронального выброса массы (скорость, геометрические признаки), индикаторов ударных процессов (включая type II радиоизлучение), показателей магнитной связности источника с межпланетной средой, а также предвестниковых сигналов в электронных и ионных каналах ACE/EPAM.

В качестве основной модели использована вариационная квантовая схема (Variational Quantum Circuit, VQC) с физически мотивированной архитектурой запутывания, отражающей нелинейные межпараметрические связи между характеристиками вспышки, КВМ, ударной волны и предвестниковыми потоками частиц. Обучение осуществлялось с хвостово-ориентированной функцией потерь, что направлено на минимизацию недооценки экстремальных SEP-событий. Сравнение проводилось с регуляризованной Ridge-регрессией, Gradient Boosting и прокси-моделью Гарсия—Балча.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На хронологическом тестовом срезе лучшая VQC-модель продемонстрировала среднюю абсолютную ошибку десятичного логарифма 0.523, среднеквадратичную ошибку десятичного логарифма 0.653, медианный фактор ошибки 2.71 и среднюю абсолютную ошибку 149 pfu. Полученные значения статистически и практически превосходят результаты прокси-подхода Гарсия—Балча (средняя абсолютная ошибка десятичного логарифма 0.755, медианный фактор ошибки 6.18) и Ridge-регрессии (0.725). Тем самым показано, что физически согласованная привязка к SXR-пику и интеграция многоканальных параметров солнечного источника и межпланетной среды обеспечивают существенное повышение прогностической точности в задаче оценки пиковой интенсивности SEP.