DOI: 10.12737/szf-123202606
EDN: SXZEVM
УДК 523.98, 528.029.69

Поступила в редакцию 10.12.2025
Принята к публикации 26.02.2026

МЕТОД МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА SOPO

MACHINE-LEARNING METHOD FOR RECONSTRUCTING NEAR-EARTH LOW-ENERGY COSMIC RAY FLUXES FROM GROUND-BASED SOPO NEUTRON MONITOR DATA

И.А. Лагойда
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, IALagoida@mephi.ru

С.А. Воронов
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, sergvor@gmail.com

Н.С. Барбашина
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, NSBarbashina@mephi.ru

И.И. Астапов
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, IIastapov@mephi.ru

I.A. Lagoida
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, IALagoida@mephi.ru

S.A. Voronov
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, sergvor@gmail.com

N.S. Barbashina
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, NSBarbashina@mephi.ru

I.I. Astapov
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, IIastapov@mephi.ru

Аннотация. В настоящее время на Земле функционирует большое количество наземных нейтронных мониторов. Эти детекторы измеряют потоки нейтронов, образующихся при взаимодействии первичных космических лучей (КЛ) с атмосферой Земли. С момента своего изобретения в 1950-х гг. они стали очень популярны при изучении вариаций интенсивности КЛ на различных временных масштабах. Эти детектирующие системы стабильны во времени и поэтому способны вести непрерывные измерения на протяжении десятков лет. В то же время им свойственна невысокая чувствительность к потокам КЛ с энергиями ≤1 ГэВ, в то время как эффекты вариаций КЛ в гелиосфере наиболее ярко выражены в низкоэнергетическом диапазоне. Быстрый рост космической отрасли за последние несколько десятилетий позволил проводить прямые измерения потоков КЛ с помощью различных научных приборов, установленных на космических аппаратах (КА). Спутниковые детекторы измеряют внеатмосферные потоки КЛ в широком диапазоне энергий от десятков килоэлектронвольт до десятков тераэлектронвольт, но экспериментальные данные, полученные с их помощью, не всегда доступны или публикуются со значительными задержками. Кроме того, радиационная обстановка в космическом пространстве постепенно приводит к снижению эффективности и стабильности спутниковых систем, поэтому время их активной работы на орбите ограничено. Наземные же детекторы в значительно меньшей степени подвержены деградации под действием радиации, а их экспериментальные данные

Abstract. Nowadays, there are a large number of ground-based neutron monitors. These detectors measure neutron fluxes produced by the interaction of primary cosmic rays (CR) with Earth's atmosphere. Since their invention in the 1950s, they have become very popular for studying variations of CR intensity on different time scales. These detection systems are stable and therefore can conduct continuous measurements for decades. However, they exhibit low sensitivity to cosmic ray fluxes with energies ≤1 GeV, whereas heliospheric variations of these fluxes are most pronounced at lower energies. The rapid growth of the space industry has made it possible to perform direct measurements of CR fluxes by a variety of scientific instruments installed on board spacecraft. Satellite-borne detectors measure cosmic ray fluxes across a wide energy range, from tens of keV up to tens of TeV. Nonetheless, experimental data collected by spacecraft is not always immediately accessible and is often published with a significant delay. Moreover, the radiation in outer space is gradually reducing the efficiency and stability of satellite systems, so their operating time in orbit is limited. Ground-based detectors are less susceptible to radiation damage, and their data is always available for scientific research. Therefore, developing methods to reconstruct top-of-atmosphere CR fluxes from ground-based detector data is increasingly urgent. This paper presents the method for calibrating the high-latitude SOPO neutron monitor by machine-learning algorithms, using data on cosmic proton fluxes with energy >500 MeV from the P11 channel of the proton sensor installed aboard the

© 2026. Лагойда И.А. и др.
Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

обычно всегда доступны для научных исследований. Вот почему задача разработки методов восстановления внеатмосферных потоков КЛ с использованием данных наземных детекторов становится все более актуальной. В данной работе описан метод, в котором с помощью алгоритмов машинного обучения проводилась калибровка высокоширотного нейтронного монитора SOPO с использованием данных о потоках космических протонов с энергией >500 МэВ, полученных каналом P11 протонного датчика, установленного на борту спутника GOES-16. Полученная в результате обучения машинная модель была использована для восстановления потока КЛ низкой энергии по данным SOPO, после чего проведено его сравнение с фактическими данными, полученными протонным датчиком спутника GOES-16.

Ключевые слова: космические лучи, форбуш-понижения, геомагнитная буря, солнечная активность.

GOES-16 satellite. The machine model obtained as the result of training was employed to reconstruct the low-energy cosmic ray flux from SOPO data. Then it was compared with actual data from the GOES-16 proton sensor.

Keywords: cosmic rays, Forbush decreases, geomagnetic storm, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

Галактические КЛ (ГКЛ) — высокоэнергетические частицы, образующиеся преимущественно в результате взрывов сверхновых звезд [Blasi, 2013; Gabici, 2022]. По мере распространения в космическом пространстве эти частицы подвержены различным процессам ускорения и торможения [Ptuskin, 2012; Bykov et al., 2018]. ГКЛ состоят в основном из протонов (~89 %) и ядер гелия (~10 %) [Dong et al., 2024]. Проникая вглубь гелиосферы, частицы ГКЛ взаимодействуют с солнечным ветром и межпланетным магнитным полем, что проявляется в изменении их направления и характера движения. Такие эффекты наблюдаются в диапазоне энергий до 30 ГэВ [Potgieter, 2013, 2014]. Регистрация временной эволюции и вариаций потоков ГКЛ является важным инструментом в изучении солнечной активности на различных временных масштабах. Солнце является источником низкоэнергетических солнечных КЛ (СКЛ) [Мирошниченко, 2018], что особенно сильно проявляется во время турбулентных процессов, происходящих в солнечной короне, таких как корональные выбросы массы (КВМ) [Kilpua et al., 2017]. КВМ часто сопровождаются выбросами солнечных энергетических частиц (solar energetic particles) [Desai, Giacalone, 2016; Bruno et al., 2018] и солнечными вспышками [Curto, 2020]. Заряженные частицы КЛ в околоземном пространстве взаимодействуют с веществом земной атмосферы. Вследствие этого рождается большое количество вторичных частиц, потоки которых регистрируются наземными установками [Riggi, 2023]. Следует отметить, что потоки низкоэнергетических КЛ являются основным источником опасного атмосферного излучения на авиационных высотах. Это может негативно влиять на стабильность работы электронных систем, особенно во время геомагнитных бурь, [Rozelot et al., 2018] и приводить к ошибкам в работе программного обеспечения, что является критичным аспектом безопасного функционирования бортовых систем самолетов, осуществляющих перевозки пассажиров [Mertens, Tobiska, 2021; Tomsia et al., 2024]. Последнее, в свою очередь, особенно актуально в свете недавнего отзыва самолетов A320 компанией Airbus ввиду найденной уязвимости программного обеспечения вследствие деструктивного воздействия потоков солнечной радиации на бортовую электронику [https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-11-airbus-update-on-a320-family-precautionary-fleet-action]. Поэтому долгосрочное наблюдение за низкоэнергетическими потоками КЛ важно для понимания физических аспектов космической погоды и их воздействия на жизнедеятельность человека. Своевременно полученные сведения о резком изменении низкоэнергетических потоков КЛ могут также быть полезны для выработки предупреждающих сигналов и прогнозов в рамках изменения космической погоды, что, в свою очередь, необходимо для планирования космических миссий.

В настоящее время изучение вариаций потоков КЛ ведутся с помощью как наземных детекторов, так и научных приборов, установленных на КА [Picozza et al., 2018; Battiston, 2020]. Спутниковые детекторы обеспечивают высокоточные прямые измерения потоков внеатмосферных КЛ в различных временных и энергетических диапазонах, однако космические эксперименты гораздо дороже, чем наземные. Уровни радиации в космосе примерно в сто раз выше. Это приводит к ускоренной деградации электронных компонентов, что, в свою очередь, снижает эффективность измерений и может привести к выходу из строя космических приборов, особенно во время мощных возрастаний потоков СКЛ. Такие воздействия на научную аппаратуру могут стать причиной искажения и потери экспериментальных данных, а также приводить к другим внештатным ситуациям [Calligaro, Gatti, 2018].

Нейтронные мониторы (НМ) являются детекторами, измеряющими интегральную интенсивность вторичного космического излучения вблизи поверхности Земли [Hatton, Carmichael, 1964; Strauss et al., 2020; Aspinall et al., 2024]. Такие установки легко обслуживать и модернизировать, они установлены в разных географических регионах и способны вести непрерывные измерения на протяжении десятилетий.

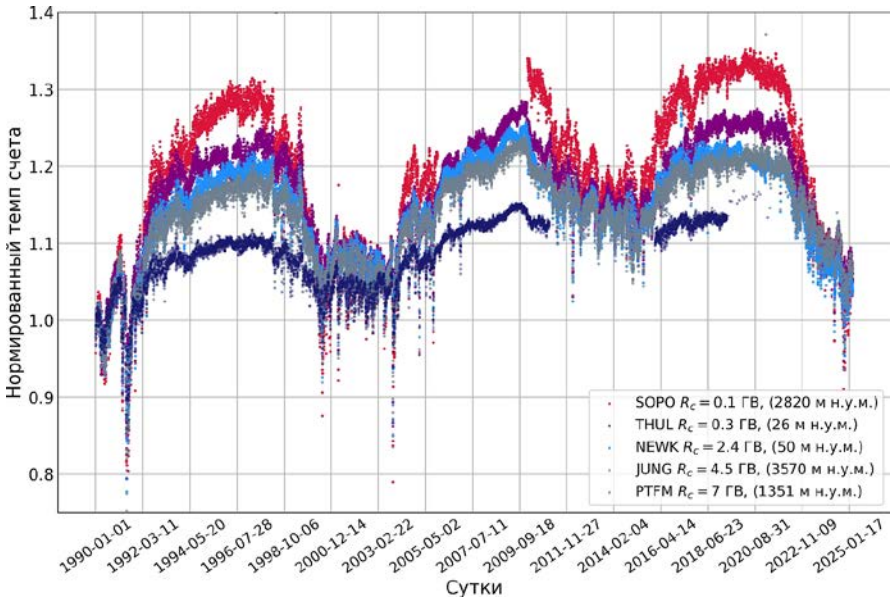


Рис. 1. Нормированные суточные темпы счета КЛ, измеренные на поверхности Земли для нескольких станций НМ в 1990–2025 гг. Нормировка проводилась на январь 1990 г. Даты указаны по UTC

Наземные детекторы не подвержены радиационному износу, однако регистрируют вторичную компоненту КЛ, образующуюся в результате взаимодействия первичных КЛ с атмосферой Земли. Вследствие этого они обладают значительно меньшей чувствительностью к низкоэнергетической компоненте КЛ (≤1 ГэВ) по сравнению с детекторами, установленными на КА [Alanko et al., 2003]. Энергетическая чувствительность НМ зависит от значения жесткости геомагнитного обрезания (R_c, ГВ) [Chu et al., 2022] и толщины атмосферы в месте расположения детектора [Mishev et al., 2020]. Жесткость геомагнитного обрезания — это минимальное значение жесткости (отношение импульса частицы к ее заряду), соответствующее порогу регистрации потока частиц в магнитосфере Земли, обусловленному экранирующим эффектом геомагнитного поля. По аналогии вводится термин «энергия атмосферного обрезания» — энергия, которую теряет частица КЛ при ее проникновении на заданную глубину земной атмосферы. Очевидно, высокоширотные НМ более чувствительны к низкоэнергетической составляющей КЛ вследствие меньшей жесткости геомагнитного обрезания. Поэтому они больше подходят для изучения различных эффектов, связанных с процессом солнечной модуляции. На рис. 1 показаны нормированные суточные темпы счета нескольких НМ. Видно, что амплитуда 11-летнего солнечного цикла заметно больше для НМ, находящихся в местах с более низкой R_c. Эти обстоятельства открывают возможности разработки методов восстановления околоземных потоков КЛ с помощью данных, полученных на поверхности Земли. Разработка подобных методов существенно расширит возможности сети наземных нейтронных мониторов с точки зрения изучения вариаций низкоэнергетических КЛ в окрестности Земли. Такие методы могут быть полезны также для верификации данных спутниковой аппаратуры во время полета на орбите Земли. В свою очередь, это позволит более рационально определять места строительства новых станций НМ [Сирук и др., 2025].

В настоящее время в данном направлении уже предпринимаются отдельные шаги [Usoskin et al., 2005; Väisänen et al., 2023]. Однако они основаны на очень упрощенном описании распространения КЛ в гелиосфере, известном как приближение силового поля [Gleeson, Axford, 1968]. Допущения, лежащие в основе данного подхода, позволяют получить аналитическое решение уравнения Паркера [Moraal, 2013], описывающего процессы переноса КЛ в гелиосфере. В рамках этого приближения для потоков протонов и ядер гелия ГКЛ можно записать

$$J(T) = J_{\mathrm{LIS}}(T+\Phi)\frac{T(T+2T_{\mathrm{r}})}{(T+\Phi)(T+\Phi+2T_{\mathrm{r}})},$$

где T — кинетическая энергия частицы, ГэВ/нукл; $J(T)$ — поток частиц с заданной энергией в определенной точке гелиосферы; $J_{\mathrm{LIS}}(T)$ — спектр частиц на границе гелиосферы; $\Phi=(eZ/A)\varphi$ — энергетические потери частиц по мере движения вглубь гелиосферы; φ — потенциал модуляции; Z — заряд ядра; A — атомный вес ядра; e — заряд электрона; T_{r} — энергия покоя частицы, ГэВ/нукл.

Алгоритмы калибровки НМ, построенные на основе данного приближения, позволяют восстанавливать потенциал модуляции φ с использованием темпов счета НМ. Помимо ограничений, присущих самому приближению силового поля [Caballero—Lopez, Moraal, 2004], такой подход оказывается неприменимым для восстановления потоков КЛ с энергиями ниже 3 ГэВ [Koldobskiy, Usoskin, 2024], в то время как эффекты, связанные с геомагнитными бурями, наиболее ярко выражены в этой энергетической области КЛ [Лагойда и др., 2024]. В настоящей работе обсуждается попытка обойти описанные ограничения с помощью алгоритмов машинного обучения.

Основная задача заключается в обучении нейронной сети (НС), способной впоследствии рассчитывать внеатмосферный поток КЛ, по данным наземных НМ.

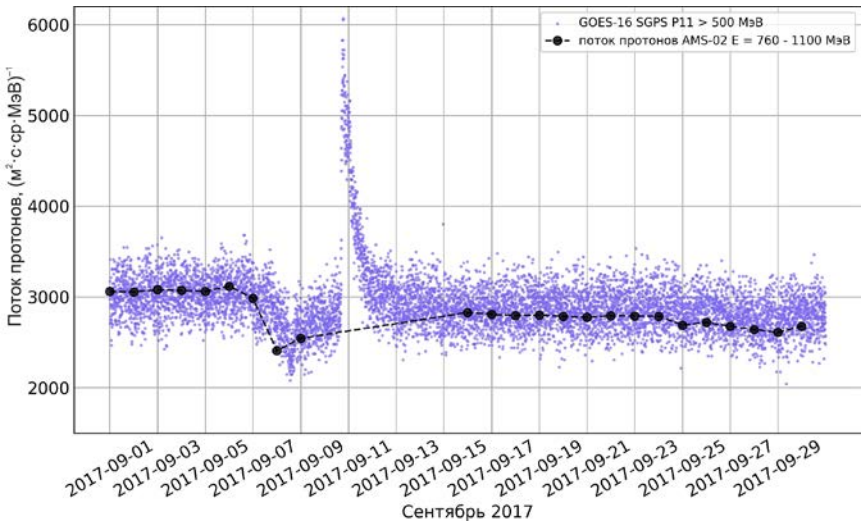


Рис. 2. Пятиминутные значения потока протонов, зарегистрированные каналом P11 спутника GOES-16, во время вспышки на Солнце в сентябре 2017 г., а также суточные значения потока протонов, зарегистрированные в этот период спектрометром AMS-02 в диапазоне энергий 760–1100 МэВ. Даты указаны по UTC

ДАННЫЕ И МЕТОД

Для обучения НС необходимы данные по потокам КЛ, зарегистрированным одновременно в околоземном космическом пространстве и на поверхности Земли. В качестве данных о первичных низкоэнергетических потоках КЛ были использованы потоки, зарегистрированные протонным датчиком (SGPS) спутникового аппарата GOES-16 [Goodman et al., 2020; Kress et al., 2021]. Этот прибор имеет несколько каналов измерений, каждый из которых предназначен для регистрации частиц в определенном интервале энергий. Для решения поставленной задачи предпочтителен канал P11, поскольку в нем измеряется интегральный поток протонов с энергиями >500 МэВ. Апертура детектора SGPS невелика, поскольку сам детектор имеет небольшие размеры. В результате канал P11, как и другие интегральные каналы в более ранних версиях спутников GOES, реально имеет верхний предел по энергии регистрации частиц. Эффективная энергия зарегистрированных частиц КЛ для интегральных каналов составляет ~1 ГэВ [Bruno, 2017; Hu, Semones, 2022]. На рис. 2 показан временной профиль потока протонов канала P11 во время солнечной вспышки в сентябре 2017 г. [Kress et al., 2021]. Можно увидеть также суточный поток протонов КЛ, зарегистрированный спектрометром AMS-02 в диапазоне энергий 760–1100 МэВ [Aguilar et al., 2021]. Сопоставление этих данных свидетельствует об их хорошем согласии.

Полярные регионы Земли характеризуются низким значением R_c, поэтому доминирующим фактором, влияющим на чувствительность полярных НМ к низкоэнергетической составляющей КЛ, является энергия атмосферного обрезания. Согласно современным расчетам [Mishev, Poluianov, 2021; Poluianov, Batalla, 2022], ее величина не превосходит 450 МэВ для полярных станций, расположенных на уровне моря. Поэтому именно высокоширотные НМ должны быть чувствительны к энергетическому диапазону канала P11 спутника GOES-16.

В качестве данных о потоках КЛ, зарегистрированных на поверхности Земли, были выбраны данные полярного НМ SOPO [Oh et al., 2012], расположенного на высоте 2820 м над уровнем моря с R_c=~0.09 ГВ. Основу используемого в работе массива данных составляют среднесуточные значения потоков канала P11 прибора SGPS спутника GOES-16 и среднесуточные темпы счета НМ станции SOPO. На рис. 3 показаны нормированные значения среднесуточного потока протонов, зарегистрированного каналом P11, в сравнении с нормированными значениями темпа счета НМ SOPO. Нормировка проводилась по среднему значению, рассчитанному за две недели начиная с 1 ноября 2020 г.

Нейронная сеть — сложная структура, состоящая из множества нейронов, объединенных в слои. Слои являются ключевыми компонентами сети, которые отвечают за последовательную обработку информации. Существует слои трех основных типов: входные, скрытые и выходные. Входные слои служат для приема данных, скрытые — для обработки и выявления закономерностей, выходные — для формирования результатов. Нейроны, расположенные в соседних слоях, связаны между собой по принципу «все со всеми». Это означает, что сигнал от каждого отдельного нейрона предыдущего слоя поступает на вход каждого нейрона следующего слоя. Поведение каждого нейрона в сети зависит от функции активации, которая задает характер его реакции на величину входного сигнала [Lederer, 2021]. Такая архитектура позволяет НС эффективно моделировать сложные нелинейные зависимости. Процесс обучения НС основан на решении задачи минимизации значения функции ошибки. Функция ошибки (Loss Function) — это функция, измеряющая, насколько сильно предсказания НС отклоняются от реальных значений [Wang et al., 2022; Zhang et al., 2019]. Минимизация функции ошибки осуществляется путем вычисления оптимальных параметров нейронов, являющихся элементарной вычислительной ячейкой сети. Процесс обучения представляет собой повторя-

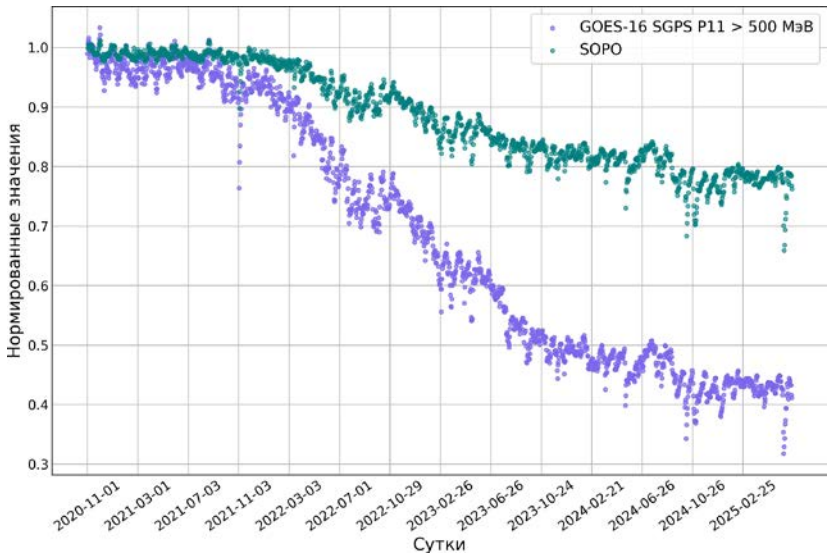


Рис. 3. Среднесуточный нормированный поток космических протонов, зарегистрированный каналом P11 (E>500 МэВ) прибора SGPS, установленного на борту спутника GOES-16, в сравнении с нормированными значениями темпов счета НМ SOPO в период с 1 ноября 2020 г. по 21 июня 2025 г. Даты указаны по UTC

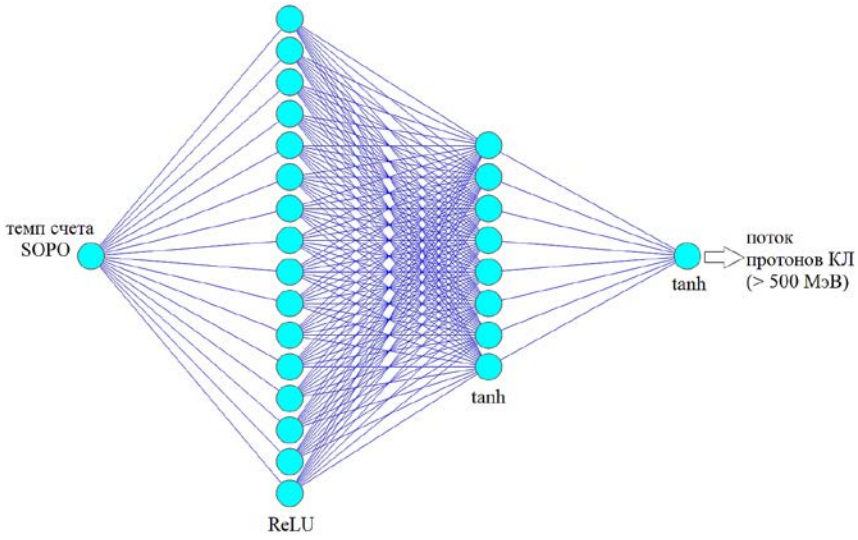


Рис. 4. Архитектура НС, используемой для калибровки НМ SOPO

ющийся цикл, длящийся определенное количество итераций. Продолжительность обучения, как правило, определяется целевыми показателями точности модели. В ходе этого цикла алгоритм градиентного спуска или его модификации оптимизирует параметры нейронов, минимизируя функцию ошибки, которая отражает отклонение предсказаний модели от целевых значений. Детали данного процесса подробно описаны в [Nielsen, 2015; Netrapalli, 2019]. На рис. 4 показана архитектура используемой НС. На вход сети подавались нормированные значения суточного темпа счета НМ SOPO. На выходе ожидалось нормированное значение потока космических протонов, соответствующее значению среднесуточного потока, зарегистрированного каналом P11 прибора SGPS спутника GOES-16. Для первого слоя нейронов использовалась функция активации ReLU [Banerjee et al., 2019], для второго и третьего — функция активации гиперболического тангенса [Lau, Hann, 2018].

Полученный набор данных, соответствующий временному диапазону измерений канала P11 спутника GOES-16, был разделен на две части: первая использовалась для обучения, вторая — для тестирования. К тестовому набору данных были отнесены данные каждых шестых суток начиная с 1 ноября 2020 г. Кратковременные изменения потоков КЛ, вызванные различными турбулентными процессами в межпланетном пространстве, использовались для проведения обобщающих тестов разработанной модели. Для этого в течение наблюдаемого периода было выявлено несколько форбуш-понижений (ФП). Эффект ФП является откликом частиц КЛ на распространение КВМ в космическом пространстве и заключается в резком падении регистрируемой интенсивности КЛ [Cane, 2000]. Даты отобранных событий ФП, а также некоторые их характеристики показаны в таблице. Видно, что амплитуды ФП, рассчитанные с помощью внеатмосферных потоков КЛ, в среднем в два раза больше по сравнению с амплитудами, изме-

Характеристики событий ФП, отобранных для тестирования полученной модели: дата — начало ФП; КВМ — событие КВМ, потенциально ответственное за формирование наблюдаемого ФП [Gopalswamy et al., 2009]; амплитуда (P11) — амплитуда ФП по данным канала P11; амплитуда (SOPO) — амплитуда ФП по данным НМ SOPO

Дата, UTC	КВМ, UTC	Амплитуда (P11), %	Амплитуда (SOPO), %
03.11.2021	28.10.2021, 15:48 02.11.2021, 02:48	~17 %	~9 %
13.03.2022	10.03.2022, 18:48	~9 %	~4 %
24.03.2024	23.03.2024, 01:25	~13 %	~6 %
10.08.2024	09.08.2024, 21:36	~10 %	~4 %
05.10.2024	03.10.2024, 12:48 03.10.2024, 20:36	~23 %	~13 %
31.05.2025	31.05.2025, 00:12	~27 %	~17 %

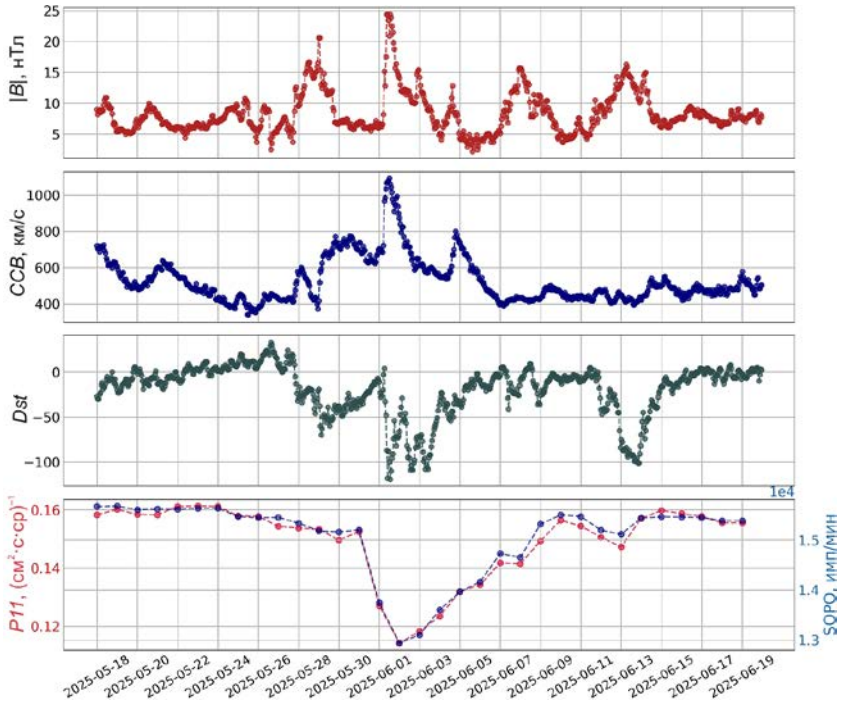


Рис. 5. ФП, наблюдавшееся в мае 2025 г. в потоке космических протонов (МэВ), зарегистрированном спутником GOES-16, и в темпе счета НМ SOPO. Показаны также временные профили часовых значений модуля напряженности межпланетного магнитного поля $|B|$, скорости солнечного ветра ССВ и индекса геомагнитной активности *Dst*. Даты указаны по UTC

ренными по данным НМ SOPO. Амплитуды ФП вычислялись относительно значений потока КЛ, усредненного за пять суток до начала наблюдаемого события.

Событие 31 мая 2025 г. стало самым значительным по амплитуде в период максимума цикла солнечной активности в рассматриваемом временном интервале. Оно было отмечено также самым низким значением наблюдаемого потока КЛ, соответствующего периоду измерений GOES-16. В свою очередь, событие, зафиксированное 3 ноября 2021 г., оказалось самым значительным в период минимума цикла солнечной активности за тот же временной промежуток. Включение крайних значений исследуемой величины в обучающую выборку необходимо для того, чтобы модель могла охватить весь диапазон возможных входных и выходных значений для рассматриваемых физических величин в процессе обучения. То же касается и максимальных амплитуд наблюдаемых эффектов, которые могут возникать в различных физических условиях, таких как максимумы и минимумы солнечного цикла. Поэтому эти события были включены в обучающую выборку данных для НС. Информация о потоках КЛ в периоды ФП, произошедших 13 марта 2022 г., 24 марта, 10 августа и 5 октября 2024 г., была исключена из набора данных, выбранного для обучения НС, и использована для дальнейшей проверки репрезентативной способности получаемой модели. На рис. 5 показан временной профиль потоков КЛ, соответствущий самому высокоамплитудному событию ФП. Показаны также временные профили индекса геомагнитной активности *Dst* и основных характеристик межпланетного пространства, таких как скорость солнечного ветра ССВ и модуль напряженности межпланетного магнитного поля $|B|$ из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]. Видно, что ударный фронт КВМ достиг окрестности Земли в районе 1 июня. Максимальный эффект понижения наблюдается примерно 2 июня, после чего началась фаза восстановления ФП. Во временных профилях физических характеристик межпланетного простран-

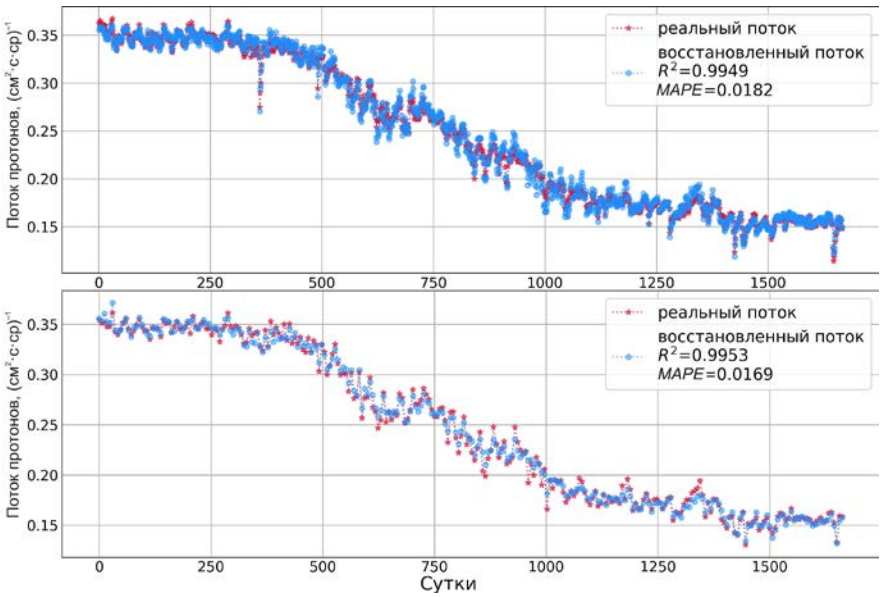


Рис. 6. Потоки космических протонов, зарегистрированные каналом P11 спутника GOES-16 в период с 1 ноября 2020 г. по 21 июня 2025 г., в сравнении с их значениями, восстановленными по данным НМ SOPO. Вверху — потоки КЛ, восстановленные для выборки данных, используемой для обучения НС. Внизу — потоки КЛ, восстановленные для тестовой выборки, не участвовавшей в обучении (каждые шестые сутки начиная с 1 ноября 2020 г.)

ства можно увидеть существенные флуктуации значений как до наблюдаемого явления, так и после него. Вероятно, изрезанность профилей связана с небольшими КВМ, которые происходили на Солнце в непосредственной близости от основного события 31 мая, что характерно для фазы максимума активности солнечного цикла.

Для обучения НС применялся оптимизированный алгоритм стохастического градиентного спуска [Kingma, Ba, 2014]. Для расчета точности стадий обучения и тестирования использовался коэффициент детерминации R^2 и средняя абсолютная процентная ошибка *MAPE* (mean absolute percentage error):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{J}_i - J_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(J - \overline{J}_i\right)^2},\ MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{J_i - \hat{J}_i}{J_i},$$

где J_i —реальный поток протонов, зарегистрированный каналом P11 спутника GOES-16; $\hat{J}_i$ — поток протонов, восстановленный по данным НМ SOPO; $\overline{J}_i$ — среднее значение реального внеатмосферного потока протонов в течение рассматриваемого периода; n — общее количество суток.

Для построения модели НС использовалась библиотека Keras [https://github.com/fchollet/keras] языка программирования Python. Результаты обучения и тестирования показаны на рис. 6. Сходимость, рассчитанная по метрике коэффициента детерминации для тестовой и обучающей выборок, составила $R^2 \approx 99.5$ %, а средняя абсолютная процентная ошибка $MAPE \sim 1.7 \div 1.8$ % для обеих выборок. Видна хорошая сходимость между реальными потоками внеатмосферных КЛ и потоками, восстановленными по данным НМ SOPO, для временных отрезков, не участвовавших в обучении НС.

Результаты восстановления временных профилей внеатмосферных потоков КЛ, наблюдаемых во время ФП 13 марта 2022 г., 24 марта, 10 августа и 5 октября 2024 г., которые были исключены из обучения, показаны на рис. 7.

ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

Описана методика калибровки НМ с помощью спутниковых данных о потоках КЛ. В качестве примера проведена калибровка высокоширотного НМ SOPO с использованием результатов измерений внеатмосферных потоков КЛ в период с 1 ноября 2020 г. по 21 июня 2025 г., выполненных каналом P11 протонного датчика, установленного на спутнике GOES-16. Проведено обучение НС, принимающей на вход нормированные данные о суточном темпе счета НМ SOPO и вычисляющей значения потоков низкоэнергетических протонов, соответствующие каналу P11. Видно (см. рис. 6, 7), что потоки КЛ, восстановленные таким методом по данным НМ SOPO, хорошо согласуются с реальными значениями, полученными посредством прямых измерений в окрестности Земли. Даже для тестовых данных среднее отклонение восстановленных потоков не превосходит 2 % в сравнении с реальными значениями, измеренными спутником GOES-16. Хорошее согласие результатов наблюдается и для восстановленных временных профилей ФП, наблюдаемых во время турбулентных процессов в гелиосфере, таких как распространение КВМ.

На сегодняшний день не существует прямого метода, позволяющего восстанавливать низкоэнергетические потоки КЛ по данным наземных НМ. Результаты, полученные в данной работе, наглядно демонстрируют перспективы использования описываемого подхода в развитии методов восстановления околоземных потоков низкоэнергетических КЛ

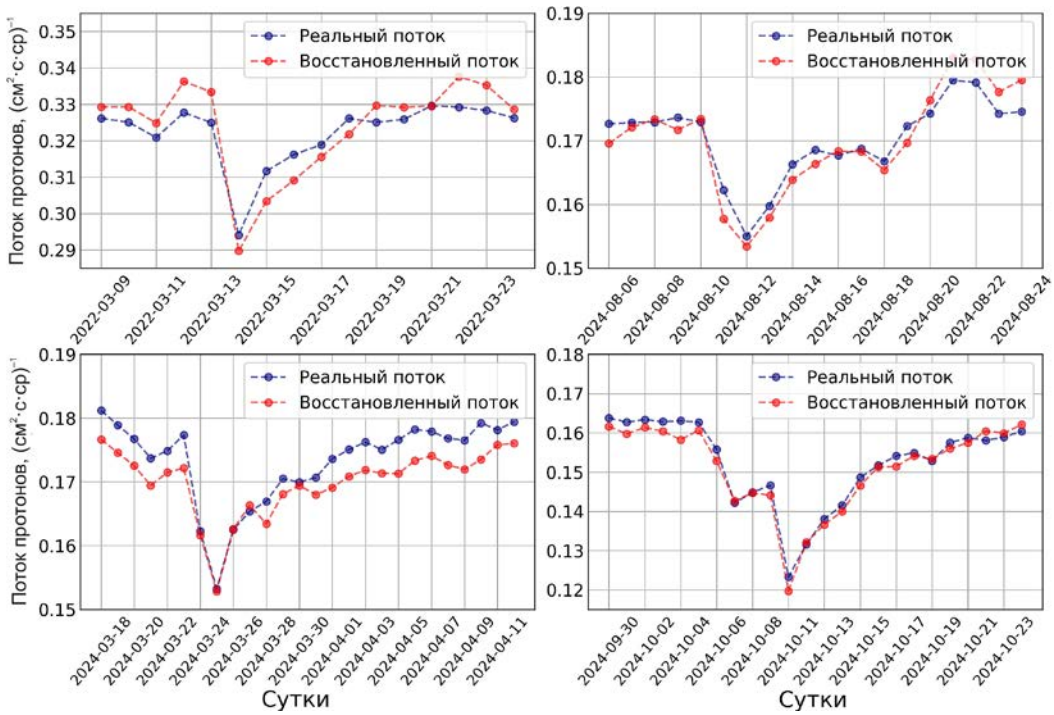


Рис. 7. Профили ФП, восстановленные с помощью данных НМ SOPO, в сравнении с реально измеренными значениями потоков КЛ. Даты указаны по UTC

за короткие и длительные периоды времени с помощью данных наземных детекторов. Такой подход может быть единственной альтернативой прямым методам восстановления потоков КЛ, так как подобных результатов не удается добиться с использованием классического моделирования ввиду сложности и масштабности физических процессов, происходящих во время взаимодействия первичных КЛ с атмосферой Земли. Разработанный подход может быть использован для восстановления внеатмосферных низкоэнергетических потоков КЛ по данным одного полярного НМ.

В дальнейшем планируется развитие разработанной методики для изучения возможностей и попытки восстановления профилей событий SEP (Solar Energetic Particles), которые наблюдаются на значительно меньших временных масштабах и оказывают доминирующее негативное воздействие на спутниковую и авиационную электронную аппаратуру.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема государственного задания № FSWU-2023-0086).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лагойда И.А., Воронов С.А., Михайлов В.В. Особенности форбуш-понижений по данным спутниковых и наземных детекторов. *Ядерная физика.* 2024, т. 87, № 2, с. 86–90. https://doi.org/10.1134/S1063778824020133.

Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи: 75 лет исследований. *Успехи физических наук*. 2018, т. 188, № 4, с. 345–376. https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038091.

Сирук С.А., Александрин С.Ю., Лагойда И.А. и др. Горные районы Российской Арктики как площадка для изучения космической погоды. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 2, с. 132–143. https://doi.org/10.12737/szf-112202513 / Siruk S.A., Alexandrin S.U., Lagoida I.A., et al. Mountainous regions of the Russian Arctic as a platform for space weather research. *Sol.-Terr. Phys*. 2025, vol. 11. iss. 2, pp. 139–143. https://doi.org/10.12737/stp-112202513.

Aguilar M., Cavasonza L.A., Ambrosi G., et al. Periodicities in the daily proton fluxes from 2011 to 2019 measured by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station from 1 to 100 GV. *Phys. Rev. Lett*. 2021, vol. 127, iss. 27, p. 271102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.271102.

Alanko K., Usoskin I.G., Mursula K., et al. Heliospheric modulation strength: Effective neutron monitor energy. *Adv. Space Res*. 2003, vol. 32, iss. 4, pp. 615–620. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00348-X.

Aspinall M.D., Alton T.L., Binnersley C.L., et al. A new ground level neutron monitor for space weather assessment. *Scientific Rep*. 2024, vol. 14, iss. 1, p. 7174. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57583-0.

Banerjee C., Mukherjee T., Pasiliao Jr.E. An empirical study on generalizations of the ReLU activation function. *Proc. ACM southeast conference.* Kennesaw, GA, USA, 2019, pp. 164–167. https://doi.org/10.1145/3299815.3314450.

Battiston R. High precision cosmic ray physics with AMS-02 on the International Space Station. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2020, vol. 43, iss. 7, pp. 319–384. https://doi.org/10.1007/s40766-020-00007-2.

Blasi P. The origin of galactic cosmic rays. *Astron. Astrophys. Rev*. 2013, vol. 21, iss. 1, pp. 1–73. https://doi.org/10.1007/s00159-013-0070-7.

Bruno A. Calibration of the GOES 13/15 high-energy proton detectors based on the PAMELA solar energetic particle observations. *Space Weather*. 2017, vol. 15, iss. 9, pp. 1191–1202. https://doi.org/10.1002/2017SW001672.

Bruno A., Bazilevskaya G.A., Boezio M., et al. Solar energetic particle events observed by the PAMELA mission. *Astrophys. J.* 2018, vol. 862, iss. 2, p. 97. https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacc26.

Bykov A.M., Ellison D.C., Marcowith A., et al. Cosmic ray production in supernovae. *Space Sci. Rev*. 2018, vol. 214, iss. 1, p. 41. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0479-4.

Caballero-Lopez R.A., Moraal H. Limitations of the force field equation to describe cosmic ray modulation. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2004, vol. 109, iss. A1, p. A01101. https://doi.org/10.1029/2003JA010098.

Calligaro C., Gatti U. *Rad-hard Semiconductor Memories*. River Publishers, 2018, 416 p. https://doi.org/10.1201/9781003339182-1.

Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases. *Space Sci. Rev*. 2000, vol. 93, iss. 1, pp. 55–77. https://doi.org/10.1023/A:1026532125747.

Chu W., Yang Y., Xu S., et al. Study on long-term variation characteristics of geomagnetic cutoff rigidities of energetic protons caused by long-term variation of geomagnetic field. *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, p. 818788. https://doi.org/10.3389/feart.2022.818788.

Curto J.J. Geomagnetic solar flare effects: A review. *J. Space Weather and Space Climate*. 2020, vol. 10, p. 27. https://doi.org/10.1051/swsc/2020027.

Desai M., Giacalone J. Large gradual solar energetic particle events. *Living Rev. in Solar Phys*. 2016, vol. 13, iss. 1, p. 3. https://doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5.

Dong X.L., Yao Y.H., Guo Y.Q., et al. New understanding of nuclei spectra properties observed by the AMS-02 experiment. *Phys. Rev. D*. 2024, vol. 109, iss. 6, p. 063027. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.063027.

Gabici S. Low-energy cosmic rays: Regulators of the dense interstellar medium. *Astron. Astrophys. Rev.* 2022, vol. 30, iss. 1, p. 4. https://doi.org/10.1007/s00159-022-00141-2.

Gleeson L.J., Axford W.I. Solar modulation of galactic cosmic rays. *Astrophys. J.* 1968, vol. 154, p. 1011. https://doi.org/10.1086/149822.

Goodman S.J., Schmit T.J., Daniels J., et al. *The GOES-R series: A new generation of geostationary environmental satellites*. Elsevier, 2020, pp. 243–250. https://10.1016/B978-0-12-814327-8.00019-3.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. The SOHO/LASCO CME catalog. *Earth, Moon, and Planets*. 2009, vol. 104, iss. 1, pp. 295–313. https://doi.org/10.1007/s11038-008-9282-7.

Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor. *Canadian J. Phys*. 1964, vol. 42, iss. 12, pp. 2443–2472. https://doi.org/10.1139/p64-222.

Hu S., Semones E. Calibration of the GOES 6–16 high-energy proton detectors based on modelling of ground level enhancement energy spectra. *J. Space Weather and Space Climate*. 2022, vol. 12, p. 5. https://doi.org/10.1051/swsc/2022003.

Kilpua E., Koskinen H.E., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Rev. Solar Phys*. 2017, vol. *14*, iss. 1, p. 5. https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6.

Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. *Proc. International Conference on Learning Representations (ICLR)*. San Diego, CA, USA, 2014. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980.

Koldobskiy S.A, Usoskin I.G. Reconstruction of solar modulation potential from AMS-02 daily data for the period 2011–2019 and its intercomparison with indirect cosmic-ray measurements. *Proc. 38th International Cosmic Ray Conference.* Nagoya, Japan, 2024, p. 1325. https://doi.org/10.22323/1.444.1325.

Kress B.T., Rodriguez J.V., Boudouridis A., et al. Observations from NOAA's newest solar proton sensor. *Space Weather*. 2021, vol. 19, iss. 12, p. e2021SW002750. https://doi.org/10.1029/2021SW002750.

Lau M.M., Hann L.K. Review of adaptive activation function in deep neural networks. *Proc. Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*. Sarawak, Malaysia, 2018, pp. 686–690. https://doi.org/10.1109/IECBES.2018.8626714.

Lederer J. Activation functions in artificial neural networks: A systematic overview. *arXiv preprint arXiv:2101.09957.* 2021. https://arxiv.org/abs/2101.09957.

Mertens C.J., Tobiska W.K. Space weather radiation effects on high-altitude/latitude aircraft. *Space Weather Effects and Applications*. Wiley, 2021, pp. 79–110. https://doi.org/10.1002/9781119815570.ch4.

Mishev A.L., Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A., et al. Updated neutron-monitor yield function: Bridging between in situ and ground-based cosmic ray measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, iss. 2, p. e2019JA027433. https://doi.org/10.1029/2019JA027433.

Mishev A.L., Poluianov S. About the altitude profile of the atmospheric cut-off of cosmic rays: new revised assessment. *Solar Phys*. 2021, vol. 296, iss. 8, p. 129. https://doi.org/10.1007/s11207-021-01875-5.

Moraal H. Cosmic-ray modulation equations. *Space Sci. Rev*. 2013, vol. 176, iss. 1, pp. 299–319. https://doi.org/10.1007/s11214-011-9819-3.

Netrapalli P. Stochastic gradient descent and its variants in machine learning. *J. Indian Institute of Science*. 2019, vol. 99, iss. 2, pp. 201–213. https://doi.org/10.1007/s41745-019-0098-4.

Nielsen M.A. *Neural Networks and Deep Learning.* San Francisco, CA, USA, Determination press, 2015, 281 p.

Oh S.Y., Bieber J.W., Clem J., et al. South Pole neutron monitor forecasting of solar proton radiation intensity. *Space Weather*. 2012, vol. *10*, iss. 5, p. S05004. https://doi.org/10.1029/2012SW000795.

Picozza P., Spillantini P., Marcelli L. Cosmic ray direct measurements. *Nuclear and Particle Physics Proc*. 2018, vol. 297, pp. 207–215. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2018.07.030.

Poluianov S., Batalla O. Cosmic-ray atmospheric cutoff energies of polar neutron monitors. *Adv. Space Res*. 2022, vol. 70, iss. 9, pp. 2610–2617. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.037.

Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays. *Living Rev. in Solar Phys*. 2013, vol. 10, iss. 1, p. 3. https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3.

Potgieter M.S. The charge-sign dependent effect in the solar modulation of cosmic rays. *Adv. Space Res*. 2014, vol. 53, iss. 10, pp. 1415–1425. https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.015.

Ptuskin V. Propagation of galactic cosmic rays. *Astroparticle Physics*. 2012, vol. 39, pp. 44–51. https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2011.11.004.

Riggi F. *The detection of extensive air showers*. Springer, 2023, pp. 155–171. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24762-0.

Rozelot J.P., Elchin S, Babayev E.S. *Variability of the Sun and Sun-like Stars: From Asteroseismology to Space Weather*. EDP Sciences, 2018, 238 p. https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2196-9.

Strauss D.T., Poluianov S., Van Der Merwe C., et al. The mini-neutron monitor: A new approach in neutron monitor design. *J. Space Weather and Space Climate*. 2020, vol. 10, p. 39. https://doi.org/10.1051/swsc/2020038.

Tomsia M., Cieśla J., Śmieszek J., et al. Long-term space missions effects on the human organism: what we do know and what requires further research. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2024, vol. 31, iss. 2, pp. 175–181. https://doi.org/10.26444/aaem/186595.

Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., et al. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951–2004. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2005, vol. 110, iss. A12, p. A12108. https://doi.org/10.1029/2005JA011250.

Väisänen P., Usoskin I., Kähkönen R., et al. Revised reconstruction of the heliospheric modulation potential for

1964–2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2023, vol. 128, iss. 4, p. e2023JA031352. https://doi.org/10.1029/2023JA031352.

Wang Q., Ma Y., Zhao K. A comprehensive survey of loss functions in machine learning. *Annals of Data Science*. 2022, vol. 9, iss. 2, pp. 187–212. https://doi.org/10.1007/s40745-020-00253-5.

Zhang N., Shen S.L., Zhou A., et al. Investigation on performance of neural networks using quadratic relative error cost function. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 106642–106652. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930520.

URL: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-11-airbus-update-on-a320-family-precautionary-fleet-action (дата обращения 12 мая 2026 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html (дата обращения 12 мая 2026 г.).

URL: https://github.com/fchollet/keras (дата обращения 12 мая 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Лагойда И.А., Воронов С.А., Барбашина Н.С., Астапов И.И. Метод машинного обучения для восстановления околоземных низкоэнергетических потоков космических лучей по данным наземного нейтронного монитора SOPO. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 3, с. 61–70. https://doi.org/10.12737/szf-123202606.