

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ  
НА КРУГОВОЙ ПОЛЯРНОЙ ОРБИТЕ: ОТБОР ПРЕДИКТОРОВ**  
**PREDICTION OF ELECTRON FLUXES IN A CIRCULAR POLAR ORBIT:  
SELECTION OF PREDICTORS**

**А.О. Белова**  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия, [belova.ao20@physics.msu.ru](mailto:belova.ao20@physics.msu.ru)

**И.Н. Мягкова**  
МГУ им. М.В. Ломоносова,  
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,  
Москва, Россия, [irina@srd.sinp.msu.ru](mailto:irina@srd.sinp.msu.ru)

**A.O. Belova**  
M.V. Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, [belova.ao20@physics.msu.ru](mailto:belova.ao20@physics.msu.ru)

**I.N. Myagkova**  
M.V. Lomonosov Moscow State University,  
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Moscow, Russia, [irina@srd.sinp.msu.ru](mailto:irina@srd.sinp.msu.ru)

**Аннотация.** Исследовалась связь вариаций потоков электронов с энергиями  $>0.7$  и  $>2$  МэВ внешнего радиационного пояса Земли на круговой полярной орбите с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также с геомагнитными индексами и логарифмом потока электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите с целью выяснения возможности их прогнозирования. Был проведен отбор оптимальных входных признаков при прогнозировании потоков электронов на низких полярных орбитах, что актуально в рамках обеспечения радиационной безопасности будущих космических миссий.

Рассматривались интегральные и максимальные потоки электронов указанных энергий за сутки. На основе линейной регрессии получены прогнозы с горизонтом 1 и 2 дня на интервале 2 месяца 2020 г. для максимальных и интегральных потоков за сутки.

**Ключевые слова:** радиационные пояса Земли, потоки релятивистских электронов, прогнозирование, машинное обучение, круговая полярная орбита.

**Abstract.** We have investigated the relationship of variations in  $>0.7$  and  $>2$  MeV electron fluxes of Earth's outer radiation belt in a circular polar orbit with solar wind and interplanetary magnetic field parameters, as well as with geomagnetic indices and the logarithmic electron flux in the geostationary orbit in order to explore the possibility of predicting them. We have selected the optimal input features for predicting electron fluxes in low polar orbits, which is important for ensuring the radiation safety of future space missions.

We have examined integral and maximum electron fluxes of these energies over the span of a day. We have obtained forecasts with a horizon of 1 and 2 days for an interval of 2 months in 2020 for daily maximum and integral fluxes based on linear regression.

**Keywords:** Earth's radiation belts, relativistic electron fluxes, forecasting, machine learning, circular polar orbit.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиационные условия в околоземном космическом пространстве в значительной мере определяются потоками заряженных частиц в радиационных поясах Земли (РПЗ). Особенно существенный вклад частиц РПЗ отмечается в периоды минимума солнечной активности, когда потоки солнечных космических лучей практически отсутствуют. И если потоки частиц внутреннего РПЗ относительно стабильны и существуют общепринятые модели, с помощью которых можно достаточно надежно прогнозировать потоки частиц в нем, то внешний радиационный пояс (ВРПЗ) имеет очень нестабильный характер: потоки электронов ВРПЗ могут в течение суток изменяться на несколько порядков. Впервые электроны ВРПЗ были зарегистрированы очень давно — во время второго в истории человечества космического полета при помощи научной аппаратуры НИИЯФ МГУ [Вернов и др., 1958]. С тех пор было выполнено большое количество экспериментов по регистрации

электронов ВРПЗ на российских и зарубежных космических аппаратах (КА) [Williams et al., 1968; Li et al., 2001; Kataoka, Miyoshi, 2008; Кузнецов и др., 2007; Li, Hudson, 2019; Оседло и др., 2022; Stepanova et al., 2024]. Несмотря на это, задача надежного прогнозирования состояния ВРПЗ на основе моделирования до сих пор не решена. Это связано с тем, что на сегодняшний день не существует общепринятой теории ускорения и рассеяния электронов ВРПЗ, которая смогла бы объяснить имеющийся набор экспериментальных данных.

Мониторинг и прогнозирование электронов ВРПЗ представляют также практический интерес, обусловленный влиянием высоких потоков релятивистских и субрелятивистских электронов ВРПЗ, которые могут негативно сказаться на работе электронной аппаратуры, установленной на борту КА, поскольку при попадании в микросхемы могут возникать единичные сбои — как обратимые, так и необратимые [Cole, 2003; Белов и др., 2004; Романова и др., 2005;

Lucci et al., 2005; Pilipenko et al., 2006; Kudela, 2013] (в англоязычной литературе их еще называют электронами-киллерами — killer electrons), а также электризация КА [Новиков, Воронина, 2021].

С одной стороны, невозможно с достаточной точностью прогнозировать вариации потоков электронов ВРПЗ с помощью теоретических расчетов, с другой, — существует практическая необходимость их прогнозирования для обеспечения радиационной безопасности с использованием современных методов машинного обучения, которые помогают выявить связи между анализируемыми переменными через аппроксимацию эмпирических зависимостей.

Спутниковые измерения, проводимые во внутренней магнитосфере Земли, используются не только для описания динамики ВРПЗ, но и для создания прогностических моделей, основанных на машинном обучении. Наиболее часто для этих целей применяются данные спутников серии GOES, имеющих длинный временной ряд экспериментальных измерений, поскольку КА данной серии запускаются с 1970-х гг. (см., например, [Wei et al., 2018; Myagkova et al., 2019; Sun et al., 2021; Landis et al., 2022; Son et al., 2022]). В настоящее время один из наиболее широко применяемых методов прогнозирования общего потока за день (флюенс) релятивистских электронов в ВРПЗ — это прогноз, представленный на портале Центра прогнозирования космической погоды [<http://www.swpc.noaa.gov/>]. Данная модель, известная как REFM (Relativistic Electron Forecast Model), была разработана на основе исследований [Baker et al., 1990]. Прогноз использует тот факт, что ежедневные значения флюенса электронов с энергией  $>2$  МэВ, измеренные на геостационарной орбите, можно предсказать на день вперед с помощью линейного фильтра, использующего в качестве входных данных скорость СВ или геомагнитные индексы  $K_p$  и  $AE$ . Исследования показали наличие характерной временной динамики в поведении потоков электронов на геостационарной орбите. Значительное увеличение потока электронов наблюдается через двое суток после достижения максимальной скорости СВ и через трое суток после регистрации пиковых значений геомагнитных индексов. Данная временная задержка обусловлена структурными особенностями потоков СВ, включающими область усиленного межпланетного магнитного поля (ММП), предшествующую пику скорости СВ. Пик ММП инициирует геомагнитную активность, приводящую к увеличению индекса  $K_p$ . Таким образом, наблюдается существенное запаздывание между показателями геомагнитной активности ( $K_p$ ,  $AE$ ) и ростом потока электронов по сравнению с непосредственными измерениями параметров СВ. Стоит упомянуть модель предсказания потоков релятивистских электронов  $>2$  МэВ на геостационарной орбите, основанную на решении системы уравнений непрерывности при условии, что на ускорение частиц влияет не только скорость СВ, но и геомагнитная активность, а на потери влияет плотность СВ. Учет дополнительных факторов, влияющих на ускорение и потери электронов в РПЗ, позволил повысить точность и стабильность прогнозов [Lyatsky, Khazanov, 2008]. Для низ-

ких энергий (1 эВ – 40 кэВ) также существует модель прогнозирования с горизонтом 1 ч на основе ММП и скорости СВ [Denton et al., 2016]. Помимо решения уравнений непрерывности, для прогноза потоков электронов существуют и другие методы — например в [Potapov et al., 2016] авторы использовали для прогноза потока релятивистских электронов с энергией  $>1\div2$  МэВ метод множественной регрессии со скользящим окном. Отдельно стоит упомянуть модель NARMAX (нелинейная авторегрессия со скользящим средним с внешними входными сигналами) [Balikhin et al., 2011]. Одним из этапов алгоритма является анализ коэффициента снижения погрешности  $ERR$ , что позволяет ранжировать параметры, влияющие на потоки в РПЗ. Именно этот анализ привел авторов к выводу, что наибольшее влияние на потоки электронов в РПЗ оказывает плотность, а не скорость СВ. При условии фиксированной плотности потоки возрастают по мере того, как скорость достигнет некоторого уровня насыщения, уменьшающегося с увеличением плотности СВ. Существует также подход к прогнозированию потоков заряженных частиц в РПЗ с использованием модели BAS Global Dynamic Radiation Belt Model [Glauert et al., 2014], построенной на основе решения трехмерного уравнения Фоккера—Планка. Разработанная модель базируется на комплексном подходе к описанию динамики заряженных частиц и включает в себя следующие физические процессы: радиальную диффузию частиц в магнитосфере Земли, взаимодействие частица—волна, столкновительные процессы, влияющие на потери частиц из радиационных поясов.

Отдельную проблему представляет собой прогнозирование потоков релятивистских и субрелятивистских электронов, регистрирующихся на полярных круговых орбитах, где на каждом витке спутник четыре раза пересекает ВРПЗ — дважды в Южном и дважды в Северном полушариях. Для круговых полярных орбит можно решать задачу прогнозирования максимального за сутки потока электронов и/или суммарного потока (флюенса), который набирается за сутки при всех пересечениях ВРПЗ спутником.

Данное исследование фокусируется на ВРПЗ и вариациях потоков электронов на круговой полярной орбите, схожей с орбитой, рассмотренной в работе [Botek et al., 2023]. В ней выполнен прогноз потоков электронов с энергиями 500–600 кэВ и 1–2.4 МэВ для круговой полярной орбиты на основе данных с КА PROBA-V с помощью модели долгой краткосрочной памяти (LSTM), входными параметрами для которой были выбраны данные о положении спутника и геомагнитном индексе  $SYM$ . В качестве исходных данных применен массив измерений за 2015–2018 гг. Для ВРПЗ среднеквадратичная ошибка (СКО) составила 0.153 для диапазона 500–600 кэВ с горизонтом 1 день.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что аналогичная низкая полярная орбита планируется к использованию в проекте Российской орбитальной станции (РОС). В связи с этим разработка методов прогнозирования радиационных условий на таких орбитах представляет значительный прак-

тический интерес для обеспечения безопасности работы КА и экипажей.

Целью данного исследования является разработка методов прогнозирования вариаций потоков релятивистских и субрелятивистских электронов ВРПЗ с энергиями  $>0.7$  и  $>2$  МэВ на круговой полярной орбите с использованием в качестве входных признаков параметров СВ, ММП, геомагнитных индексов и потока электронов на геостационарной орбите, а также оценка эффективности такого прогнозирования.

## 1. МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Обработка данных КА, обучение моделей машинного обучения и построение прогнозов были проведены с помощью программы, разработанной с использованием языка Python.

В данной работе рассматривается задача прогнозирования временных рядов, где целевой переменной является  $y_{t+h}$ , где  $h$  — горизонт прогнозирования (количество дней, на которые делается прогноз), а признаки формируются на основе лагов (запаздываний) ряда:

$$X_t = \{y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}, F_{t-1}, F_{t-2}, \dots, F_{t-p}\},$$

где  $F_t$  представляет собой временной ряд дополнительных признаков, таких как параметры СВ и пр., а  $p$  — количество лагов. Формула прогнозирования в общем виде имеет вид

$$y_{t+h} = f(X_t),$$

где  $f$  — некоторая функция прогнозирования.

Для прогнозирования потоков электронов в ВРПЗ на круговой полярной орбите использовалась модель машинного обучения — линейная регрессия. Линейная регрессия — используемая в статистике регрессионная модель зависимости одной (объясняемой) переменной  $\vec{y}$  от другой или нескольких других переменных  $\vec{X}$  с линейной функцией зависимости.

$$y_i = a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + \dots + a_m X_{mi} + a_0,$$

где  $i$  — номер наблюдения;  $a_0, a_1, \dots, a_m$  — параметры, которые надо оценить (более подробно см. [Демиденко, 1981]).

Для сравнения в дальнейшем качества прогнозов, полученных с помощью линейной регрессии, был получен прогноз на основе наивной модели. Наивная модель прогнозирования — модель, значение которой в точке прогноза равно последнему известному значению прогнозируемой переменной.

## 2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве входных данных для прогнозирования были выбраны следующие признаки.

1. Параметры СВ в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем: скорость и плотность СВ, полученные в эксперименте на КА ACE прибором SWEPAM (Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor).

2. Параметры ММП: модуль вектора поля  $B_1$  и  $B_2$ , полученные на КА ACE магнитометром MAG.

3. Геомагнитные индексы:  $Dst$  и  $K_p$ , полученные наземным центром сбора данных МЦД (Киото).

4. Логарифм максимального и интегрального за сутки потоков электронов ВРПЗ ( $>0.8$ ,  $>2$  МэВ) по данным измерения КА серии GOES.

Использовались трехчасовой  $K_p$ , часовой  $Dst$  и остальные признаки, усредненные за 1 мин. Максимальный поток определялся как наибольшее среднее за 1 мин для каждого параметра за каждые конкретные сутки.

Данные были получены из открытых источников, а именно центра анализа данных космической погоды НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/>].

Данные первых трех пунктов были преобразованы в суточные путем вычисления арифметического среднего и максимума по модулю за сутки. После таких преобразований количество признаков возросло в два раза. В дальнейшем был выполнен анализ значимости каждого из этих признаков и для каждого из них оставлен лишь один из двух аналогичных вариантов.

Выбор первых трех пунктов основан на опыте прогнозирования среднесуточного потока на геостационарной орбите в [Koons, Gorney, 1991; Ling et al., 2010], а также в последних работах научной группы НИИЯФ МГУ [Мягкова и др., 2021; Kalegaev et al., 2019, 2023].

Наиболее часто обучение модели прогнозирования временных рядов происходит на основе  $\tau$  предыдущих значений ряда. Величину  $\tau$  называют шириной окна. В работе использовалась ширина окна многомерного временного ряда, равная 26 дням. Из этого окна брались лаги, равные 1 (только для прогноза на 1 день вперед), 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13 и 26 дням. Значения лагов, соответствующие одной неделе, применяются для эффективного использования моделью текущей доступной информации о признаках, а лаги, равные 13 и 26 дням, имеют связь с периодом вращения Солнца, который составляет 25–27 дней. Как будет показано далее, рекуррентные потоки, связанные с вращением Солнца, способны оказывать значительное влияние на параметры ММП и СВ, что, в свою очередь, может существенно изменять потоки заряженных частиц в радиационных поясах.

Для работы использовался 9-месячный массив данных с 1 июня 2019 по 1 марта 2020 г., который был разбит на тренировочный и тестовый наборы данных в соотношении 7:2. Данные с 01.06.2019 по 31.12.2019 включительно использовались для тренировочного набора. Данные с 01.01.2020 по 01.03.2020 использовались в качестве тестового набора — независимых данных, которые использовались для оценки качества прогнозирования.

В рамках исследования был выбран ограниченный временной интервал, соответствующий периоду минимальной геомагнитной активности. Данный подход позволил обеспечить максимально стабильные условия для проведения сравнительного анализа, основная цель которого заключалась в сопоставлении временной динамики интегральных и максимальных за сутки потоков электронов в области ВРПЗ на малых высотах с аналогичной динамикой потоков электронов, регистрируемых на геостационарной орбите.

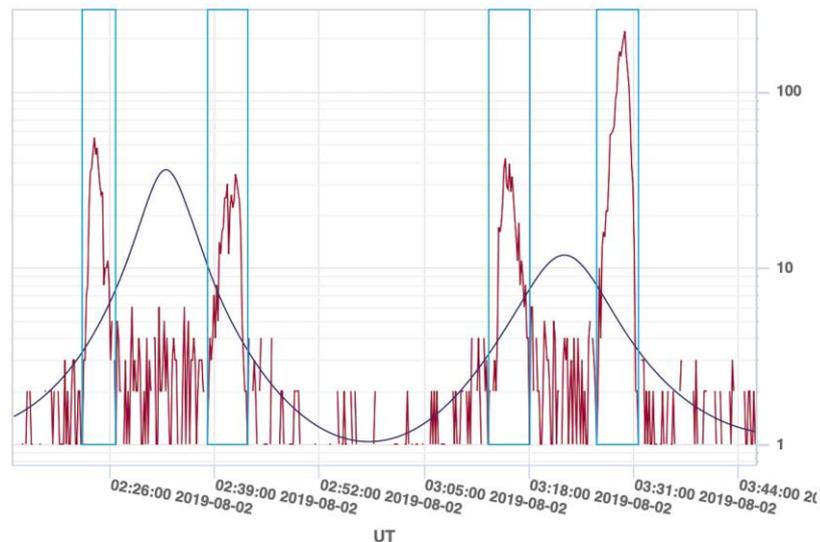


Рис. 1. Потоки электронов на круговой полярной орбите по данным КА «Метеор-М» № 2 ( $>0.7$  МэВ) и координата Мак-Илвайна  $L$

Данное исследование было проведено с учетом того факта, что в настоящее время разработаны и успешно функционируют прогностические модели потоков электронов на геостационарной орбите, основанные на методах машинного обучения.

Обучение производилось на основе данных о потоках электронов ВРПЗ, измеренных на ИСЗ «Метеор-М2» (запущен 08.07.2014). Прогноз выполнялся для максимального и интегрального за сутки потоков электронов ВРПЗ ( $>0.7$ ,  $>2$  МэВ). Орбита КА «Метеор-М2» является круговой солнечно-синхронной, высота в восходящем узле  $h=832$  км, наклонение  $i \approx 98.85^\circ$ , период обращения  $T=101.3$  мин. Таким образом, за один виток спутник пересекал ВРПЗ четыре раза (рис. 1).

Из данных, собранных на каждом витке, пройденном спутником, были выделены участки, где параметр Мак-Илвайна  $L$  изменялся в пределах от 3 до 6. На этих участках были рассчитаны интегральные потоки по формуле трапеций; интегральный поток за сутки был получен суммированием интегральных потоков на каждом таком участке. Максимальный поток за сутки рассчитывался как наибольшее значение потока, зарегистрированное на этих участках.

Следует отметить, что вместо значений потоков использовались их десятичные логарифмы в случае как целевой переменной, так и признаков, а именно потоков электронов на геостационарной орбите. Это связано с тем, что величины потоков имеют широкий динамический диапазон, занимающий несколько порядков величины.

### 3. АНАЛИЗ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

В ходе исследования были проанализированы интегральные (рис. 2, 3) и максимальные (рис. 4, 5) потоки электронов за сутки по данным КА «Метеор-М2» и GOES для энергий  $>2$  и  $>0.7$  МэВ ( $>0.8$  МэВ для GOES, так как канала с нужным порогом энергий на приборе нет). Было получено, что наблюдается заметная корреляция между данными потоками, момент возрастания на обоих спутниках совпадает,

спад же на полярной орбите более медленный и плавный по сравнению с геостационарной.

Кроме того, были проанализированы среднесуточные значения  $Dst$ ,  $K_p$ , плотности и скорости СВ и значений модуля вектора ММП (рис. 6–8). В пределах рассмотренного периода средний  $Dst$  не опускался ниже  $-40$  нТл, что говорит об отсутствии сильных геомагнитных бурь в этот период. Однако видно периодическое повышение скорости СВ до значений  $600\text{--}700$  км/с с периодом примерно 26 дней, что указывает на приход высокоскоростных рекуррентных потоков СВ, вызывающих значительные изменения состояния околоземного пространства и увеличение потоков заряженных частиц в радиационных поясах.

### 4. ОТБОР ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ

Количество полученных признаков для заданных интервалов погружения временного ряда составляет 126. Такое количество может привести к переобучению линейной регрессии на используемом интервале времени, поэтому необходимо уменьшить число признаков. Считается, что количество параметров в модели машинного обучения должно быть ниже объема обучающей выборки как минимум на порядок [Alwosheel et al., 2018]. Соответствующий расчет для нашего случая (семь месяцев, ежедневный прогноз) дает оценку  $10\text{--}20$  для максимального количества признаков.

Отбор осуществляется на основе значения коэффициента корреляции рассматриваемого признака с целевой переменной. Признаки с максимальным по модулю коэффициентом корреляции используются для дальнейшего прогнозирования.

Коэффициенты корреляции для интегрального потока электронов с энергией  $>2$  и  $>0.7$  МэВ показаны на рис. 9 и 10 соответственно. Максимальный коэффициент корреляции интегрального потока электронов с энергией  $>2$  МэВ ожидаемо наблюдается с интегральным потоком на GOES, превышая все остальные

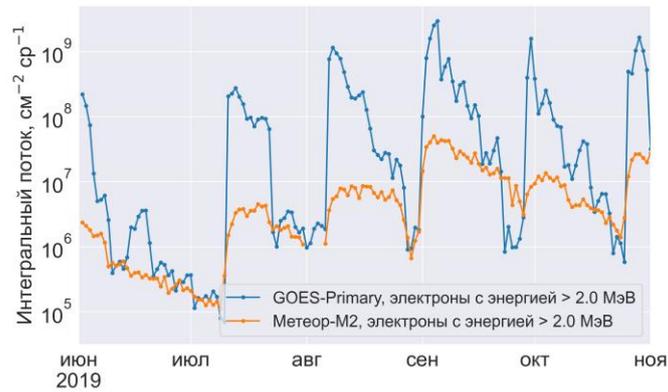


Рис. 2. Суммарные интегральные за сутки потоки электронов с энергией >2.0 МэВ по данным КА «Метеор-M2» и GOES-Primary

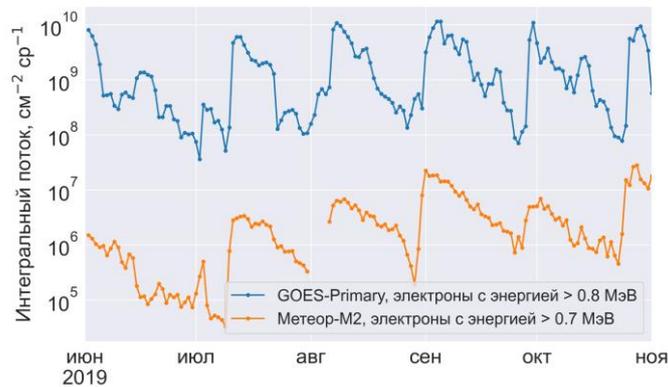


Рис. 3. Суммарные интегральные за сутки потоки электронов с энергией >0.7 и >0.8 МэВ по данным КА «Метеор-M2» и GOES-Primary соответственно

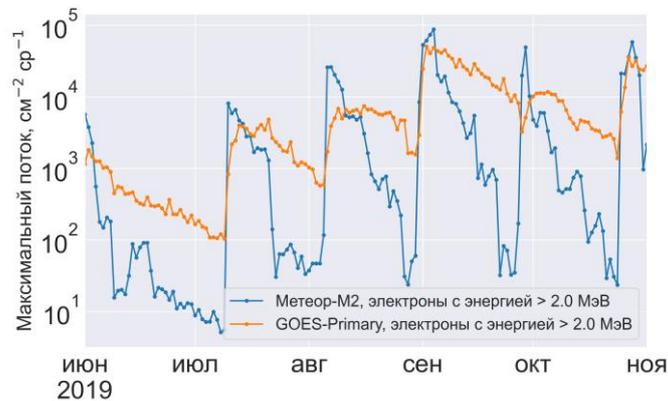


Рис. 4. Максимальные за сутки потоки электронов с энергией >2.0 МэВ по данным КА «Метеор-M2» и GOES-Primary

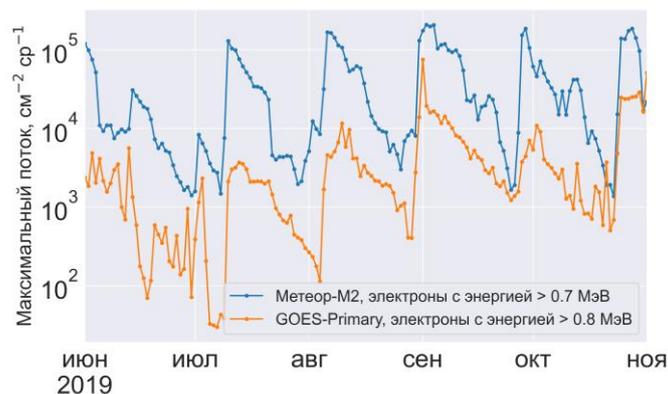


Рис. 5. Максимальные за сутки потоки электронов с энергией > 0.7 и > 0.8 МэВ по данным КА «Метеор-M2» и GOES-Primary соответственно

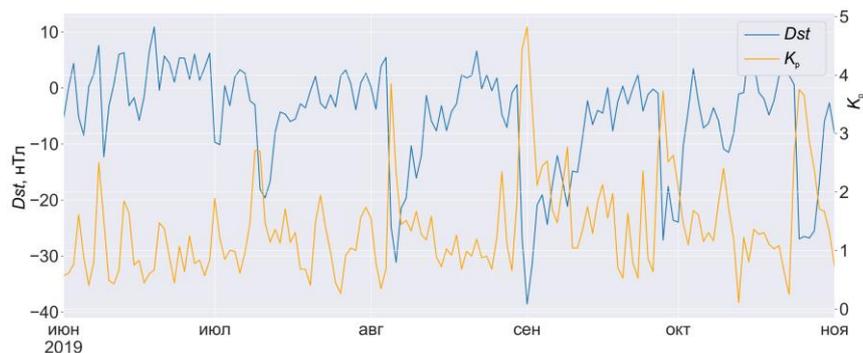


Рис. 6. Средние за сутки  $Dst$  и  $K_p$

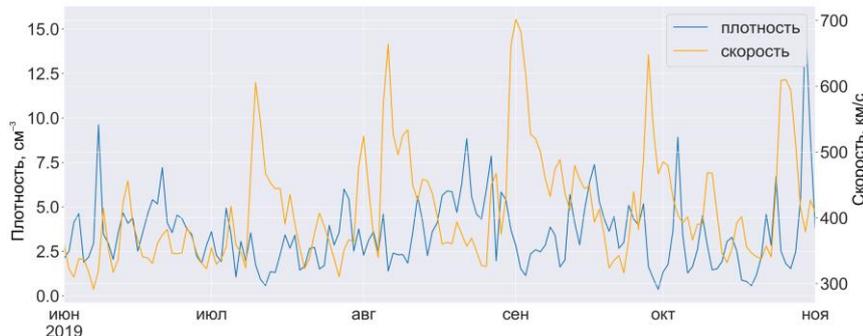


Рис. 7. Средние за сутки скорость и плотность СВ



Рис. 8. Средние за сутки  $V_z$  и  $V_t$

более чем в три раза. Это говорит о том, что основной вклад в прогноз будет вносить именно он. Следующими по значимости также ожидаемо являются скорость СВ,  $K_p$  и  $Dst$ , что соответствует существующим представлениям.

Для энергии 0.7 МэВ максимальный коэффициент корреляции также принадлежит интегральному потоку на GOES, однако в этом случае он незначительно превышает остальные коэффициенты, что указывает на более высокую вариативность потоков электронов субрелятивистских энергий по сравнению с релятивистскими.

Стоит отметить, что средние за сутки значения показывают больший, по модулю коэффициент корреляции по сравнению с максимальными значениями, что подтверждает необходимость использования именно их для прогноза.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Полученные с помощью линейной регрессии и наивной модели прогнозы для интегрального и мак-

симального потока электронов за сутки показаны на рис. 11–18 ( $k$  — количество признаков, используемое для получения данного прогноза).

Результаты прогнозирования потоков электронов с энергией  $>2$  МэВ оказались значительно лучше, что, возможно, связано с их более высокой квазистационарностью. Прогнозировать максимальные потоки получается хуже, чем интегральные, так как у них наблюдается большой разброс значений за интервал времени в пределах нескольких дней.

Для оценки количественных показателей качества прогноза были рассчитаны коэффициент множественной детерминации  $R^2$  и среднее квадратичное отклонение. Расчет проводился на тестовом наборе, т. е. на тех данных, которые не использовались в процессе обучения модели.

Для анализа качества модели решения данной задачи был получен прогноз на основе наивной модели и рассчитаны его характеристики. Значения указанных величин приведены в таблице. Синим цветом выделены лучшие показатели для каждого из горизонтов прогноза и для данной энергии. Видно, что во всех случаях

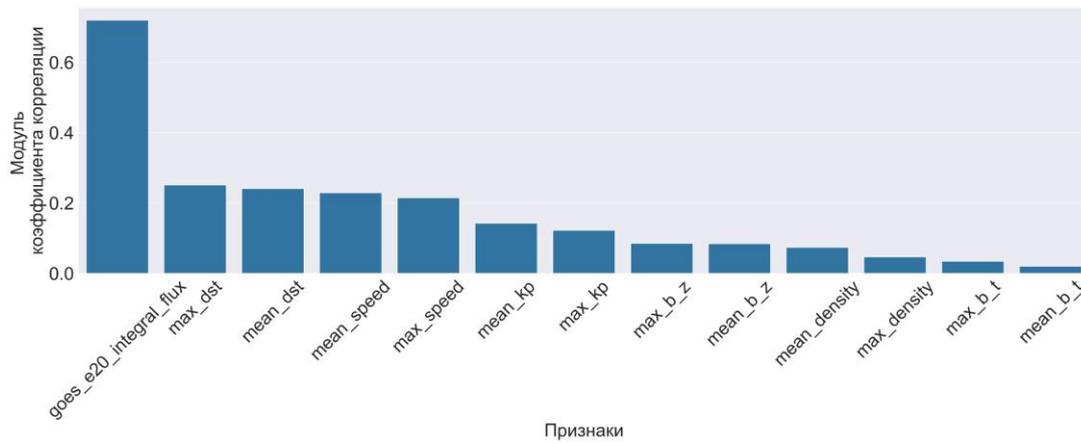


Рис. 9. Модуль коэффициента корреляции интегрального за сутки потока электронов с энергией >2 МэВ

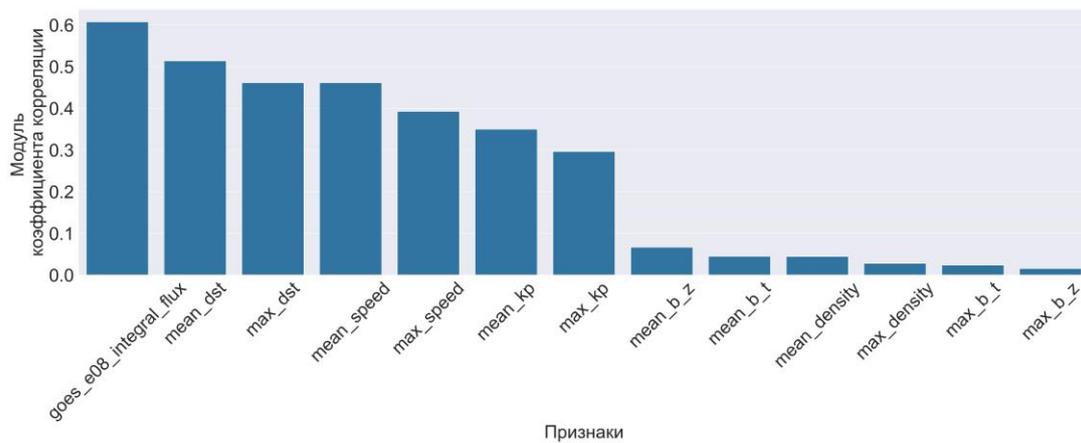


Рис. 10. Модуль коэффициента корреляции интегрального за сутки потока электронов с энергией >0.7 МэВ

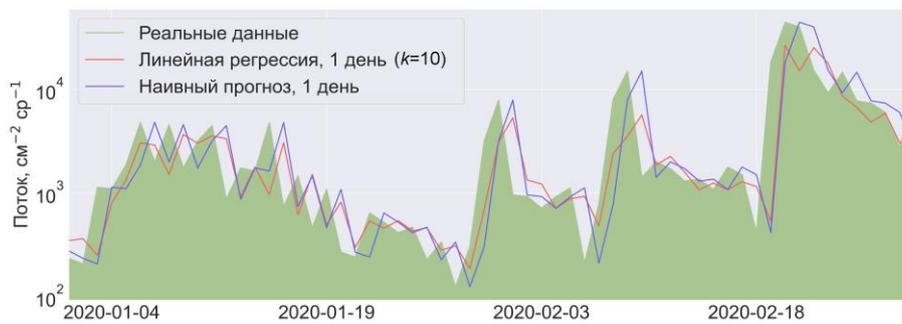


Рис. 11. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 1 день

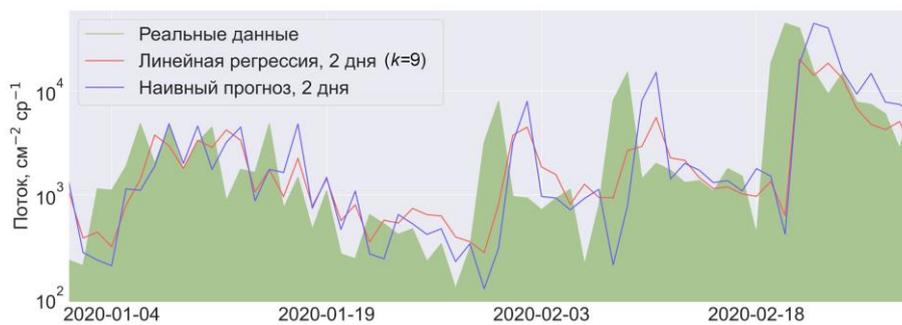


Рис. 12. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 2 дня

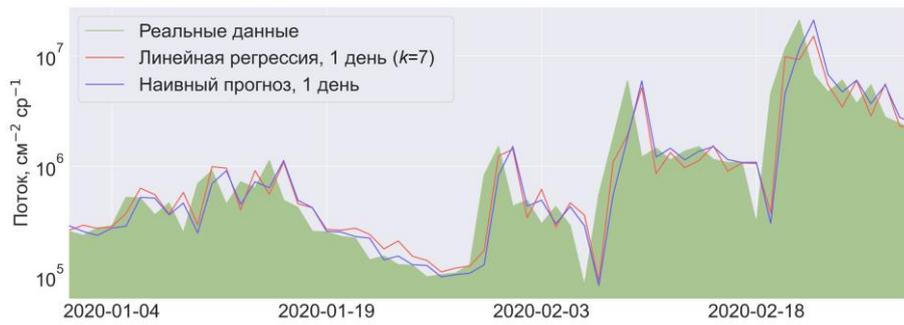


Рис. 13. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 1 день

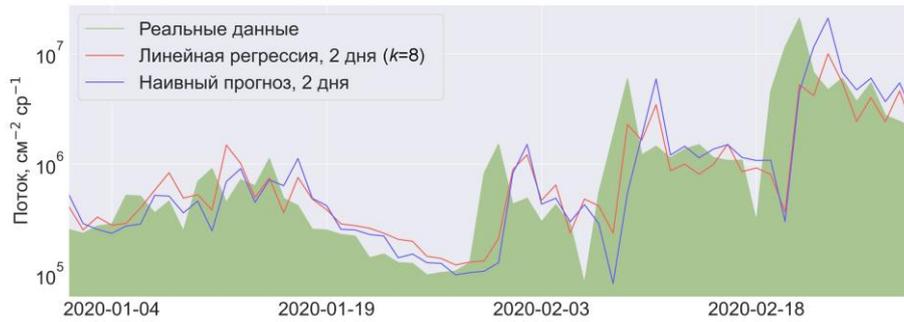


Рис. 14. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 2 дня

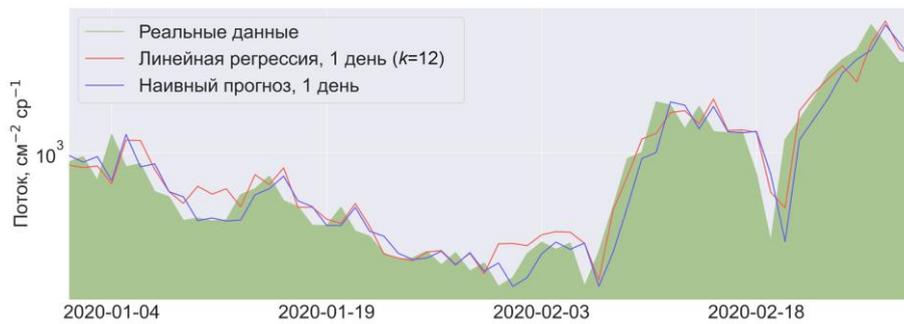


Рис. 15. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 1 день

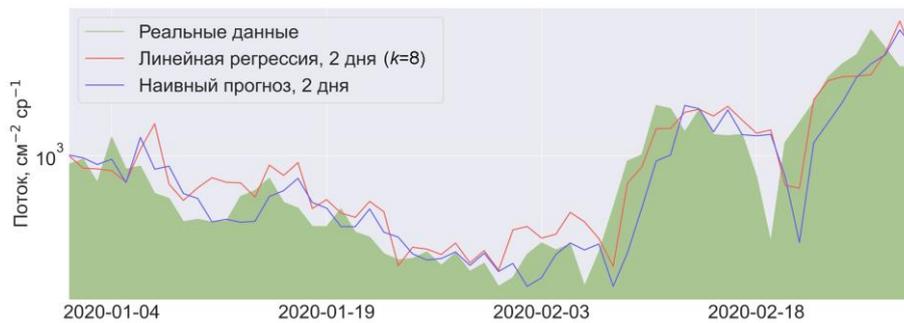


Рис. 16. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 2 дня

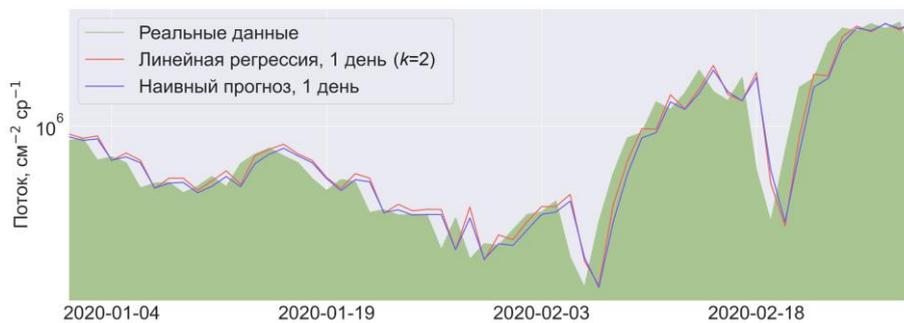


Рис. 17. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 1 день

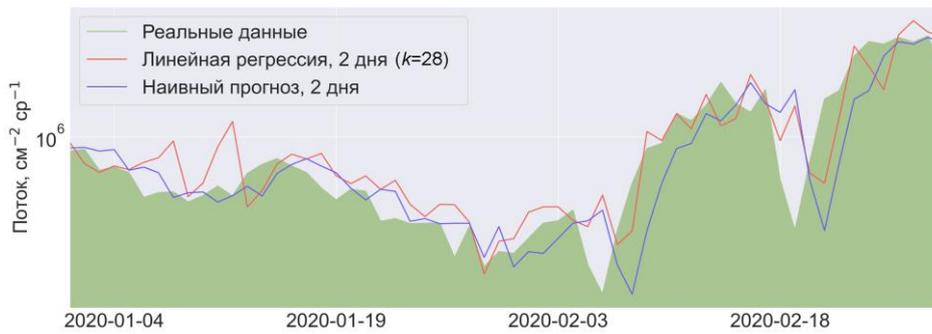


Рис. 18. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 2 дня

Метрики моделей машинного обучения, используемых в задаче прогнозирования потоков электронов с энергией >0.7 и >2 МэВ

	Прогноз на 1 день		Прогноз на 2 дня	
Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ				
Модель\Метрики	$R^2$	СКО	$R^2$	СКО
Наивный прогноз	0.663	0.325	0.382	0.439
Линейная регрессия	0.696	0.308	0.550	0.375
Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ				
Модель\Метрики	$R^2$	СКО	$R^2$	СКО
Наивный прогноз	0.372	0.471	-0.046	0.608
Линейная регрессия	0.558	0.395	0.316	0.492
Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ				
Модель\Метрики	$R^2$	СКО	$R^2$	СКО
Наивный прогноз	0.819	0.156	0.603	0.232
Линейная регрессия	0.825	0.154	0.708	0.199
Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ				
Модель\Метрики	$R^2$	СКО	$R^2$	СКО
Наивный прогноз	0.852	0.144	0.721	0.198
Линейная регрессия	0.888	0.125	0.776	0.177

наивный прогноз показывает результаты хуже, чем выполненный при помощи линейной регрессии. Получено также, что для  $E > 0.7$  МэВ характеристики лучше для прогноза интегральных потоков, а для  $E > 2$  МэВ лучше себя показывает прогноз максимальных потоков. При увеличении горизонта прогноза ожидаемо наблюдается значительное ухудшение качества прогнозов для обоих энергетических диапазонов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследования возможности прогнозирования вариаций потоков (использовался логарифм потока) электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергиями >0.7 и >2 МэВ, измеренных на круговой полярной орбите. Прогноз выполнялся с помощью машинного обучения, где в качестве входных признаков использовались параметры солнечного ветра и межпланетного

магнитного поля, а также геомагнитные индексы и логарифм потока электронов ВРПЗ на геостационарной орбите. Проведен отбор оптимальных входных параметров при прогнозировании потока электронов на низкой полярной орбите. Получено, что на полярной орбите максимальный коэффициент корреляции интегрального потока электронов ВРПЗ с энергией >2 МэВ наблюдается с интегральным потоком на геостационарной орбите (GOES). В сочетании с уже имеющимися результатами прогнозирования потоков электронов на геостационарной орбите на несколько суток вперед [Мягкова и др., 2021; Kalegaev et al., 2023] постановку задачи прогнозирования потоков электронов на полярных орбитах можно считать перспективной.

На основании полученных в ходе исследования результатов можно предположить, что для получения более точных прогностических моделей следу-

ющим возможным этапом должно быть расширение используемого временного ряда экспериментальных данных, а также исследование в рамках данной задачи более сложных моделей машинного обучения — таких, например, как искусственные нейронные сети и градиентный бустинг.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, [<https://rscf.ru/project/22-62-00048/>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004, т. 44, № 4, с. 502–510.
- Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. *Доклады Академии наук*. 1958, т. 120, № 6, с. 1231–1233.
- Демиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессия*. М.: Финансы и статистика. 1981, 302 с.
- Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др. Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ «КОРОНАС-Ф». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2007, т. 41, № 4, с. 369–378.
- Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Шугай Ю.С. и др. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли методами машинного обучения. *Метеорология и гидрология*. 2021, № 3, с. 47–57. DOI: [10.52002/0130-2906-2021-3-47-57](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-3-47-57).
- Новиков Л.С., Воронина Е.Н. *Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой*. М.: КДУ. 2021, 560 с.
- Оседло В.И., Калегаяев В.В., Рубинштейн И.А. и др. Мониторинг радиационного состояния околоземного пространства на спутнике «Арктика-М» № 1. *Космические исследования*. 2022, т. 60, № 6, с. 439–453. DOI: [10.31857/S0023420622060085](https://doi.org/10.31857/S0023420622060085).
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В., Белов А.В. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 3, с. 186–193.
- Alwosheel A., van Cranenburgh S., Chorus C.G. Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. *J. Choice Modelling*. 2018, vol. 28, pp. 167–182. DOI: [10.1016/j.jocm.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jocm.2018.07.002).
- Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Klebesadel R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 RE. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, iss. A9, pp. 15133–15140. DOI: [10.1029/JA095iA09p15133](https://doi.org/10.1029/JA095iA09p15133).
- Balikhin M.A., Boynton R.J., Walker S.N., et al. Using the NARMAX approach to model the evolution of energetic electrons fluxes at geostationary orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2011, vol. 38, iss. 18. DOI: [10.1029/2011GL048980](https://doi.org/10.1029/2011GL048980).
- Botek E., Pierrard V., Winant A. Prediction of radiation belts electron fluxes at a Low Earth Orbit using neural networks with PROBA-V/EPT data. *Space Weather*. 2023, vol. 21, iss. 7, e2023SW003466. DOI: [10.1029/2023SW003466](https://doi.org/10.1029/2023SW003466).
- Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability. *Space Sci. Rev.* 2003, vol. 107, pp. 295–302. DOI: [10.1023/A:1025500513499](https://doi.org/10.1023/A:1025500513499).
- Denton M.H., Henderson M.G., Jordanova V.K., et al. An improved empirical model of electron and ion fluxes at geosynchronous orbit based on upstream solar wind conditions. *Space Weather*. 2016, vol. 14, iss. 7, pp. 511–523. DOI: [10.1002/2016SW001409](https://doi.org/10.1002/2016SW001409).
- Glauert S.A., Horne R.B., Meredith N.P. Three-dimensional electron radiation belt simulations using the BAS Radiation Belt Model with new diffusion models for chorus, plasmaspheric hiss, and lightning-generated whistlers. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, iss. 1, pp. 268–289. DOI: [10.1002/2013JA019281](https://doi.org/10.1002/2013JA019281).
- Iucci N., Levitin A., Belov E., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, iss. 1. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kalegaev V., Panasyuk M., Myagkova I., et al. Monitoring, analysis and post-casting of the Earth's particle radiation environment during February 14 – March 5, 2014. *Space Weather Space Climate*. 2019, vol. 9, iss. A29. DOI: [10.1051/swsc/2019029](https://doi.org/10.1051/swsc/2019029).
- Kalegaev V., Kaportseva K., Myagkova I., et al. Medium-term prediction of the fluence of relativistic electrons in geostationary orbit using solar wind streams forecast based on solar observations. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 72, iss. 12, pp. 5376–5390. DOI: [10.1016/j.asr.2022.08.033](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.033).
- Kataoka R., Miyoshi Y. Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous orbit. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 6, pp. 1335–1339. DOI: [10.5194/angeo-26-1335-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1335-2008).
- Koons H.C., Gorney D.J. A neural network model of the relativistic electron flux at geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 1991, vol. 96, iss. A4, pp. 5549–5556. DOI: [10.1029/90JA02380](https://doi.org/10.1029/90JA02380).
- Kudela K. Space weather near Earth and energetic particles: Selected results. *J. Physics Conference Ser.* 2013, vol. 409, iss. 1. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012017).
- Landis D.A., Saikin A.A., Zhelavskaya I., et al. NARX neural network derivations of the outer boundary radiation belt electron flux. *Space Weather*. 2022, vol. 20, iss. 5, e2021SW002774. DOI: [10.1029/2021SW002774](https://doi.org/10.1029/2021SW002774).
- Li W., Hudson M.K. Earth's Van Allen radiation belts: From discovery to the Van Allen Probes era. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, iss. 11, pp. 8319–8351. DOI: [10.1029/2018JA025940](https://doi.org/10.1029/2018JA025940).
- Li X., Baker D.N., Kanekal S.G., et al. Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, iss. 20, pp. 3827–3830. DOI: [10.1029/2001gl013586](https://doi.org/10.1029/2001gl013586).
- Ling A.G., Ginet G.P., Hilmer R.V., Perry K.L. A neural network-based geosynchronous relativistic electron flux forecasting model. *Space Weather*. 2010, vol. 8, iss. 9. DOI: [10.1029/2010SW000576](https://doi.org/10.1029/2010SW000576).
- Lyatsky W., Khazanov G.V. A predictive model for relativistic electrons at geostationary orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, iss. 15, L15108. DOI: [10.1029/2008GL034688](https://doi.org/10.1029/2008GL034688).
- Myagkova I., Efitov A., Shiroky V., Dolenko S.A. Quality of prediction of daily relativistic electrons flux at geostationary orbit by machine learning methods. *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Text and Time Series*. 2019, pp. 556–565. DOI: [10.1007/978-3-030-30490-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4_45).
- Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J. Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, iss. 6, pp. 1192–1205. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.152](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.152).
- Potapov A., Ryzhakova L., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit. *Acta Astronaut.* 2016, vol. 126, pp. 47–51. DOI: [10.1016/j.actaastro.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.017).
- Son J., Moon Y.-J., Shin S. 72-hour time series forecasting of hourly relativistic electron fluxes at geostationary orbit by

- deep learning. *Space Weather*. 2022, vol. 20, iss. 10, e2022SW003153. DOI: [10.1029/2022sw003153](https://doi.org/10.1029/2022sw003153).
- Stepanova M., Pinto V., Antonova E. Regarding the relativistic electron dynamics in the outer radiation belt: a historical view. *Rev. Modern Plasma Physics*. 2024, vol. 8, iss. 25. DOI: [10.1007/s41614-024-00165-4](https://doi.org/10.1007/s41614-024-00165-4).
- Sun X., Lin R., Liu S., et al. Modeling the relationship of  $\geq 2$  MeV electron fluxes at different longitudes in geostationary orbit by the machine learning method. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, iss. 17, p. 3347. DOI: [10.3390/rs13173347](https://doi.org/10.3390/rs13173347).
- Wei L., Zhong Q., Lin R., et al. Quantitative prediction of high-energy electron integral flux at geostationary orbit based on deep learning. *Space Weather*. 2018, vol. 16, iss. 7, pp. 903–916. DOI: [10.1029/2018SW001829](https://doi.org/10.1029/2018SW001829).
- Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J. Observations of trapped electrons at low and high altitudes. *J. Geophys. Res.* 1968, vol. 73, iss. 17, pp. 5673–5696. DOI: [10.1029/ja073i017p05673](https://doi.org/10.1029/ja073i017p05673).  
URL: <https://swx.sinp.msu.ru/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/22-62-00048/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Белова А.О., Мягкова И.Н. Прогнозирование потоков электронов на круговой полярной орбите: отбор предикторов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 77–87. DOI: [10.12737/szf-113202509](https://doi.org/10.12737/szf-113202509).