

Долготная зависимость потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли по данным ИСЗ «МЕТЕОР-М» № 2

А. О. Белова^{1,*}, И. Н. Мягкова^{2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, ул. Колмогорова, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 15.08.2024)

В работе использованы данные спутника «МЕТЕОР-М» № 2, который имел круговую полярную орбиту и регистрировал потоки электронов в различных энергетических диапазонах. Для получения долготной зависимости потоков брались данные за период июня–июля 2019 г., соответствующий минимуму солнечной и геомагнитной активности. Для решения поставленной задачи была разработана программа для автоматизации процесса анализа данных и определения областей прохождения спутником внешнего радиационного пояса Земли. Была получена зависимость потоков электронов от долготы и L -параметра МакИлвайна, а также выведена формула для пересчета потоков с одной долготы на другую, которая позволяет вычислять значения потоков на последующих участках орбиты.

PACS: 94.30.Xy

УДК: 537.591.5

Ключевые слова: электроны, внешний радиационный пояс, геомагнитно спокойный период, долготная зависимость.

ВВЕДЕНИЕ

Радиационные условия в околоземном космическом пространстве (ОКП) при отсутствии солнечной активности в значительной мере определяются потоками заряженных частиц в радиационных поясах Земли (РПЗ). И если внутренний РПЗ является довольно стабильным, то для внешнего РПЗ характерны резкие изменения потоков электронов с большой амплитудой (на порядок величины и более [1]). При этом на круговой полярной орбите данные сильные изменения могут быть связаны не только с воздействием изменяющихся межпланетного магнитного поля (ММП) и его компонент, а также солнечного ветра (СВ) [2, 3] и возмущенности геомагнитного поля, но и от того, на какой долготе и в каком полушарии Земли находился спутник в момент измерений [4].

Попадание в зоны с большими потоками заряженных частиц может негативно сказаться на технике, установленной на борту космического аппарата [5–7]. Поэтому важно иметь возможность оперативного мониторинга радиационных условий и прогнозирования состояния околоземного космического пространства. Данное исследование фокусируется на внешнем радиационном поясе Земли и пространственно-временных вариациях потоков электронов в нем, что является одной из ключевых проблем при прогнозировании радиационных условий на круговых полярных орбитах.

1. ЭЛЕКТРОНЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

Земля обладает собственным магнитным полем, являющимся в первом приближении дипольным. Как известно, любое дипольное поле имеет области, недоступные для частиц с кинетической энергией меньше критической. Если частица с энергией ниже критической все же оказывается в такой области, она не может покинуть ее без внешнего воздействия, что приводит к образованию так называемых зон захвата [8]. В этих зонах удерживаются значительные потоки захваченных частиц, преимущественно протонов и электронов. Зоны с большими потоками заряженных частиц вокруг нашей планеты называются радиационными поясами Земли (РПЗ). Радиационные пояса Земли были открыты в 1958 г. Ван Алленом [9] (внутренний пояс) и С.Н. Верновым и А.Е. Чудаковым [10, 11] (внешний пояс). Именно это открытие стало первым шагом в исследовании свойств потоков заряженных частиц вокруг Земли. В первом приближении РПЗ представляет собой тороид, в котором явно выделяются две области:

- внутренний радиационный пояс на расстоянии примерно от 1.2 до 3 радиусов Земли, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- внешний радиационный пояс на высоте от 3 до 10 радиусов Земли, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки и сотни кэВ [12].

* belova.ao20@physics.msu.ru

† irina@srd.sinp.msu.ru

Особенностью потоков заряженных частиц на низких орбитах (до 1000 км) с большим наклоном является сильная зависимость от географической долготы точки измерений и геомагнитных условий, что и является объектом данного исследования. Данная зависимость связана в основном с тем, что на низких орбитах магнитное поле Земли сильно отличается от дипольного, что особенно хорошо заметно на примере Бразильской Магнитной Аномалии (БМА).

2. МЕТОДИКА

Основной задачей данного исследования является получение формулы, позволяющей оценить поток захваченных электронов внешнего РПЗ на некоторой долготе исходя из известного значения потока на долготе, где на данный момент проводятся измерения с помощью космического аппарата. Данная формула дает возможность анализировать быстрые вариации состояния внешнего РПЗ на малых высотах. Сравнивая последовательные витки без сведения данных на разных долготах к одной, мы получаем сочетание пространственно-временных вариаций. Это связано с тем, что геомагнитное поле на каждом следующем витке отличается от условий на предыдущем, а близкие к пройденным координаты спутник будет иметь только через сутки. Решаемая задача является актуальной, поскольку большинство физических процессов, приводящих к вариациям внешнего РПЗ, имеют время развития существенно меньше суток.

В предположении, что в геомагнитно спокойный период потоки электронов на всех долготах изменяются равномерно и форма их зависимости от долготы остается примерно постоянной, для решения данной задачи требуется построить усреднённые за достаточно длительный интервал времени потоки заряженных частиц внешнего РПЗ.

Поскольку мы изучаем потоки электронов внешнего РПЗ, нам необходимо исследовать только измерения, проведенные в этой области. Так как выбранный спутник находится на низкой полярной орбите, за один оборот он пересекает внешний РПЗ десятки раз. В этой связи для исследования длительных временных интервалов ручной отбор данных оказывается необоснован. Вместо этого определение областей прохождения внешнего РПЗ было автоматизировано.

Вся обработка данных с космического аппарата была осуществлена с помощью программы, разработанной с использованием языка Python [13] и библиотек matplotlib [14], numpy [15], tqdm [16], sklearn [17] и pandas [18].

2.1. Классификатор на основе логистической регрессии

В работе для автоматизации выбора областей прохождения внешнего радиационного пояса из набора

данных был использован классификатор на основе логистической регрессии.

Логистическая регрессия — разновидность множественной регрессии (регрессии на основе нескольких признаков), общее назначение которой состоит в анализе связи между признаками (называемыми также регрессорами или предикторами) и статистически зависимой от них переменной. Бинарная логистическая регрессия применяется в случае, когда происходит классификация по двум классам. Зависимой переменной в этом случае является вероятность принадлежности анализируемого объекта к одному из классов, изначально выбранному произвольно.

Логистическая регрессия хорошо подходит для задач оценки вероятностей событий по экспериментальным признакам [19], с чем и связано ее использование в настоящей работе.

Модель

Пусть \mathbf{x} — признаки, y — вероятность принадлежности примера с данными признаками к заранее выбранному классу (0 или 1 в случае достоверно известных данных). В нашей задаче $y = 1$ для области прохождения внешнего РПЗ и $y = 0$ в противном случае. В качестве признаков взяты некоторые характеристики зависимости потока от времени в логарифмическом масштабе, подробно описанные далее.

В рамках модели логистической регрессии вероятность y оценивается аппроксимацией

$$h_{\theta}(\mathbf{x}) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha\mathbf{x} + \beta)}}, \quad (1)$$

где $\theta = (\alpha, \beta)$ — настраиваемый параметр.

Интерпретация и выбор параметров

Параметр θ был выбран таким образом, чтобы минимизировать на наборе примеров (\mathbf{x}_i, y_i) , где $i = 1, \dots, N$, значение функции потерь

$$J(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \ln(h_{\theta}(\mathbf{x}_i)) + (1 - y_i) \ln(1 - h_{\theta}(\mathbf{x}_i))]. \quad (2)$$

Выражение под знаком суммы стремится к $-\infty$, когда для i -го примера предсказания модели $h_{\theta}(\mathbf{x}_i)$ радикально отличаются от реального значения y_i , и достигает единственного максимума, когда они совпадают. Множитель $\frac{1}{N}$ обеспечивает одинаковый порядок величины значений $J(\theta)$ для различных размеров выборки N ; знак — является данью традиции. Выбор θ , минимизирующего функцию потерь, таким образом, обеспечивает приблизительное согласие между моделью и реальностью.

Заметим, что построенная модель выдает вероятность справедливости гипотезы $h_{\theta}(\mathbf{x}) \in (0, 1)$, а не

однозначный ответ. Для того, чтобы решить исходную задачу классификации, требуется ввести решающее правило, по которому будет приниматься или отвергаться гипотеза. Из природы модели естественным образом вытекает рандомизированный критерий, принимающий гипотезу с вероятностью $h_\theta(\mathbf{x})$, однако для воспроизводимости результатов в качестве решающего правила в работе был использован жесткий порог $h_\theta(\mathbf{x}) > \frac{1}{2}$.

2.2. Пересчет потоков электронов с одной долготы на другую

Аппроксимация зависимости потока электронов от L и долготы

Для удобства дальнейшего пересчета потоков с одной долготы на другую необходимо провести аппроксимацию зависимости потока электронов от L и долготы. В данной работе это было сделано с помощью системы тригонометрических функций, которая по построению автоматически учитывает периодичность долготы. Ниже приведена формула этой аппроксимации.

$$I(L, \phi) = \sum_{k=0}^m \sum_{j=0}^n a_{kj} \sin\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right) \sin(\phi \cdot j) + b_{kj} \sin\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right) \cos(\phi \cdot j) + c_{kj} \cos\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right) \sin(\phi \cdot j) + d_{kj} \cos\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right) \cos(\phi \cdot j) \quad (3)$$

Здесь ϕ — долгота, I — логарифм потока, L_{max} и L_{min} — границы диапазона L , соответствующего внешнему РПЗ. Пределы суммирования $m = 4, n = 6$ подобраны вручную из соображений соответствия аппроксимации реальным данным и подавления шума.

Формула для пересчета потоков с одной долготы на другую

Описанная выше аппроксимация является двумерной, она нужна для лучшей визуализации результатов работы программы. Однако же для пересчета потоков нам необходимо выделить срез этой аппроксимации по долготе, то есть $I(L)$ при фиксированном значении ϕ . Формула для логарифма потока на срезе приведена ниже.

$$I(L) = \sum_{k=0}^m \alpha_k \sin\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right) + \beta_k \cos\left(\frac{\pi k(L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}}\right)$$

$$\begin{cases} \alpha_k = \sum_{j=0}^n a_{kj} \sin(\phi \cdot j) + b_{kj} \cos(\phi \cdot j), \\ \beta_k = \sum_{j=0}^n c_{kj} \sin(\phi \cdot j) + d_{kj} \cos(\phi \cdot j). \end{cases} \quad (4)$$

3. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТОКОВ ЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РПЗ ОТ L И ДОЛГОТЫ В ГЕОМАГНИТНО СПОКОЙНЫЙ ПЕРИОД

Зависимость потока от долготы основана на зависимости потока от разницы напряженности магнитного поля в северном и южном полушарии на одной и той же долготе, которая в свою очередь зависит от долготы согласно модели магнитного поля Земли (IGRF) [20]

В ходе представленной работы использовались данные низкоорбитального полярного спутника «МЕТЕОР-М» №2 (запущен 08.07.2014) за период с 13.06.2019 01:10 по 15.06.2019 02:15. Орбита спутника «МЕТЕОР-М» №2 солнечно-синхронная, высота в восходящем узле $h = 832$ км, наклонение $i \sim 98.8^\circ$, период обращения $T = 101.3$ мин. Таким образом, за один виток спутник пересекал внешний радиационный пояс Земли (РПЗ) четыре раза. Электроны релятивистских и субрелятивистских энергий: >100 кэВ, >300 кэВ, >700 кэВ и >2 МэВ — регистрировались с помощью телескопа из полупроводниковых и сцинтилляционного детекторов. На спутнике «МЕТЕОР-М» №2 было установлено два набора телескопов с углами обзора в 30° , расположенных перпендикулярно силовым линиям и вдоль их. Измерения в нашем случае проводятся на высоких широтах, поэтому с хорошей степенью точности можно считать, что детектор, который расположен перпендикулярно силовым линиям, регистрирует потоки захваченных частиц.

Указанный интервал времени использовался для обучения классификатора на основе логистической регрессии, определяющего, содержит ли заданный интервал времени повышение потоков электронов, соответствующее прохождению внешнего РПЗ. Загруженные за выбранный период данные были разбиты на окна, удовлетворяющие ряду условий: наблюдения проводились в одном из 20-градусных интервалов долготы, в северном или южном полушарии, утром или вечером согласно MLT (местное магнитное время) при монотонно изменяющемся L в интересующем диапазоне от 1.1 до 20. Для каждого такого окна было вручную записано, содержится ли в нем область прохождения внешнего РПЗ.

Наложенные на L условия нужны для выделения внешнего радиационного пояса, это видно на приведенной иллюстрации (см. рис. 1). На ней приведен характерный временной профиль потоков электронов по данным «МЕТЕОР-М» №2 в магнитоспокойное время для одного витка. За один оборот низковысотный спутник пересекает внешний радиационный пояс 4 раза (дважды в южном и дважды в северном полушарии) и один раз за виток может пересечь внутренний ра-

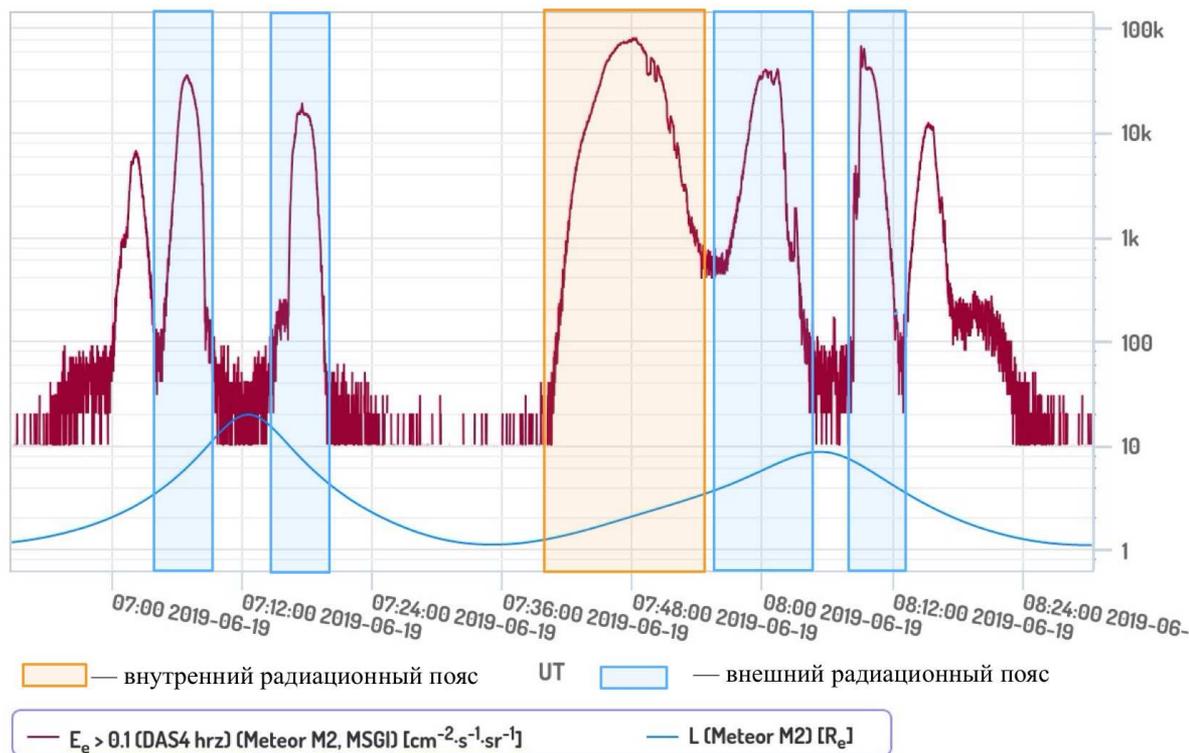


Рис. 1. Временной ход электронов с энергией >100 кэВ по данным Meteor-M2

диационный пояс в области БМА. Северное и южное полушарие рассматриваются отдельно, т.к. имеют абсолютно разные зависимости напряженности магнитного поля от долготы, разделение на утро и вечер необходимо в силу различной структуры магнитного поля со стороны, обращенной к солнцу и скрытой от него.

Для каждого из окон с областями прохождения внешнего радиационного пояса была построена зависимость потока электронов с энергией 100 кэВ и выше от времени в логарифмической шкале. На основе этих зависимостей были выделены семь признаков: значения потока в начале, посередине и в конце окна, его максимальное и минимальное значение, среднее значение и стандартное отклонение. Они использовались для обучения модели на указанном интервале времени и последующей классификации не размеченных в ручную окон на более широком временном диапазоне.

Для дальнейшего анализа использовались данные для потоков электронов внешнего РПЗ за интервал времени 01.06.2019 00:00–02.08.2019 00:00. На их основе были построены усредненные профили внешнего пояса в спокойный геомагнитный период для каждого диапазона долготы. Это было сделано по отдельности для каждой из четырех групп областей прохождения внешнего РПЗ: северные утренние, северные вечерние, южные утренние и южные вечерние. По этим данным была построена вышеописанная аппроксимация зависимости потоков электронов от L и долготы (см. рис.

2–3, 4–5). Хорошо заметно, что при меньших энергиях радиационный пояс шире, чем при более высоких, кроме того его максимум смещен в сторону больших L .

Выбор данного периода связан с малой геомагнитной активностью, что хорошо видно на иллюстрации 6. На заданном промежутке геомагнитный индекс Dst изменяется слабо, к тому же небольшие возмущения ≈ 25 нТл (выделены серым) были исключены из рассмотрения.

4. МЕТОД ПЕРЕСЧЕТА ПОТОКОВ ЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ОДНОЙ ДОЛГОТЫ НА ДРУГУЮ

Для пересчета потоков электронов, полученных с космического аппарата на одной долготе, на другую долготу необходимо взять коэффициенты a , b , c , d и с их помощью рассчитать модельную зависимость потока от L для конечной и исходных долгот (см. рис. 7).

Данные коэффициенты могут при необходимости быть получены при обращении на почту автора. При делении финальной зависимости на исходную будет получена зависимость коэффициента пересчета от L (см. рис. 8). Домножив имеющиеся данные для начальной долготы на этот коэффициент, получим искомым гипотетический поток на требуемой долготе.

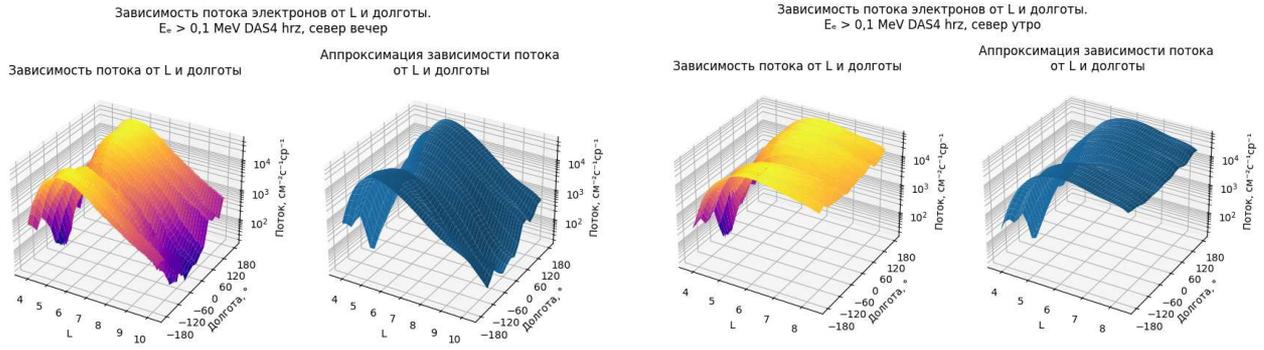


Рис. 2. Зависимость потока захваченных электронов с энергией >0.1 МэВ от долготы и L для северного полушария

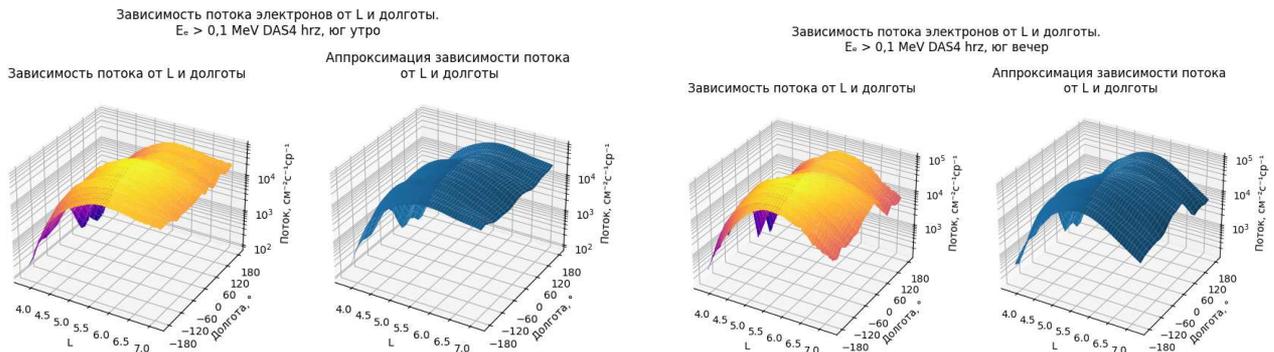


Рис. 3. Зависимость потока захваченных электронов с энергией >0.1 МэВ от долготы и L для южного полушария

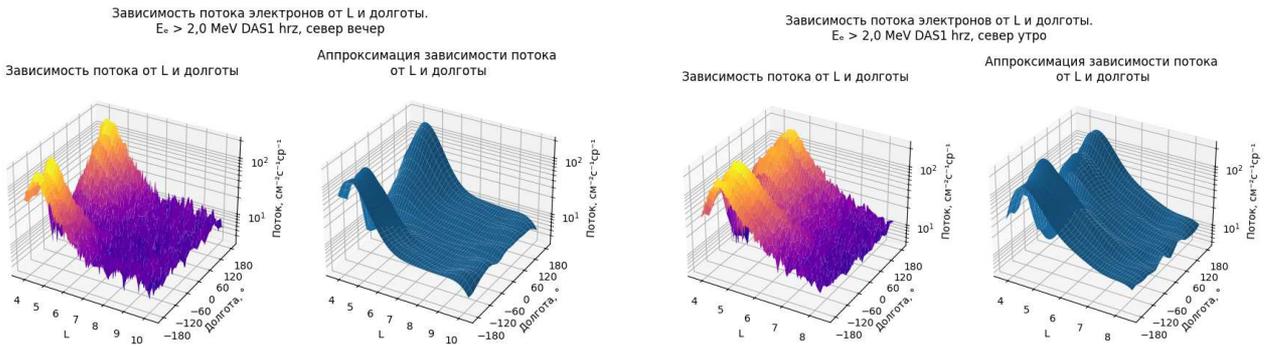


Рис. 4. Зависимость потока захваченных электронов с энергией >2 МэВ от долготы и L для северного полушария

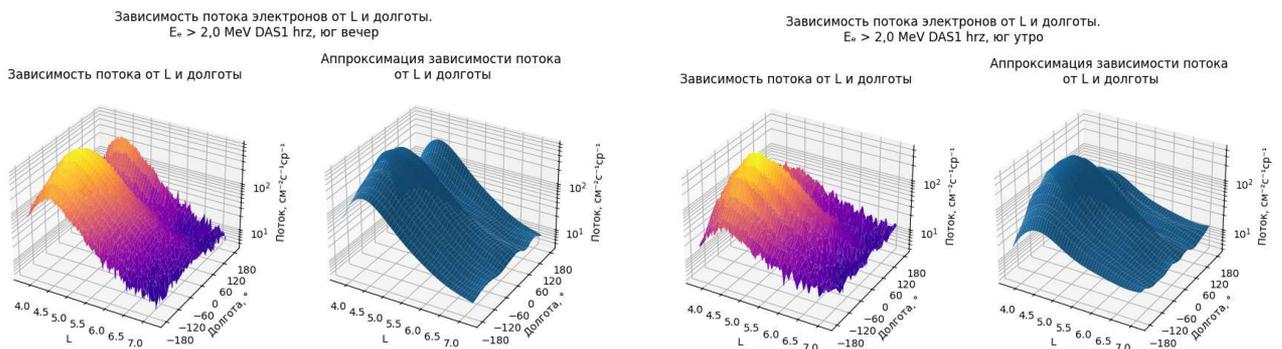


Рис. 5. Зависимость потока захваченных электронов с энергией >2 МэВ от долготы и L для южного полушария

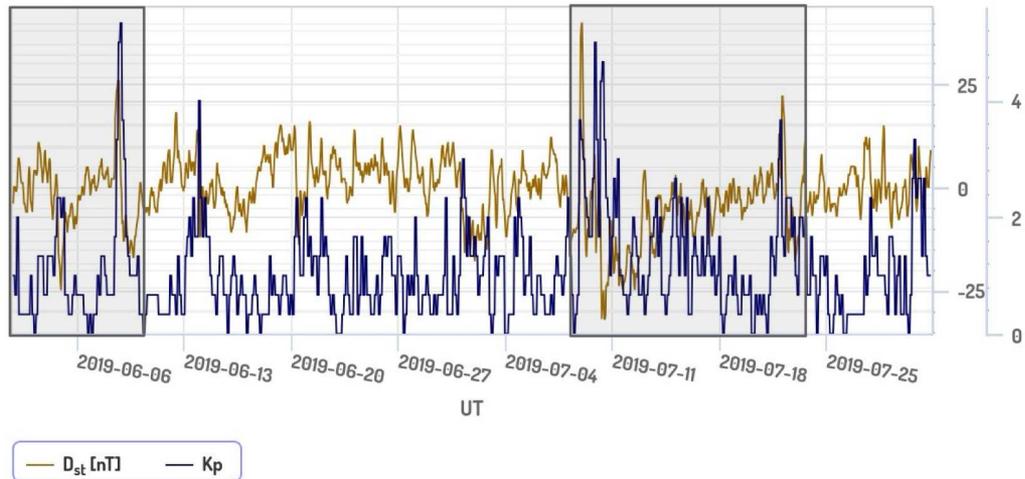


Рис. 6. Изменение индексов Dst и Kp на интервале времени 01.06.2019–02.08.2019

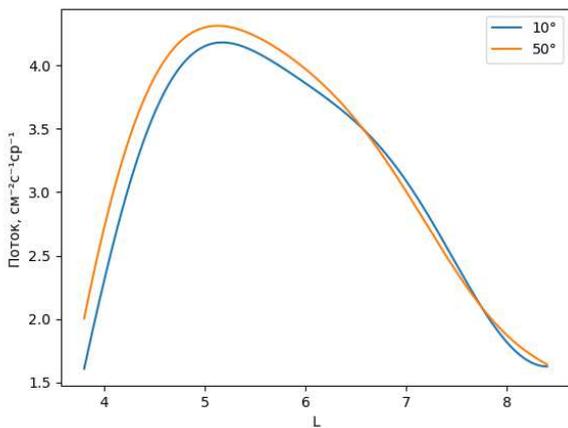


Рис. 7. Зависимость потока захваченных электронов с энергией >0.1 МэВ от L для северного полушария в вечернее время для долгот 10° и 50°

тервалов времени, а также исследовать поведение дол-

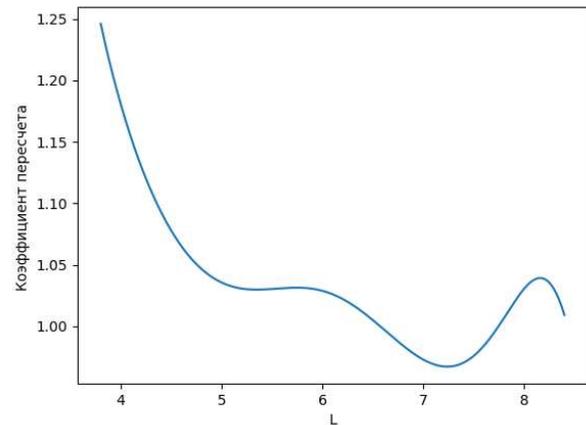


Рис. 8. Коэффициент пересчета с долготы 10° на 50° для потока захваченных электронов с энергией $>0,1$ МэВ для северного полушария в вечернее время

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была получена аппроксимирующая зависимость потоков электронов субрелятивистских и релятивистских энергий от долготы и L -параметра на основании данных низкоорбитального полярного спутника «МЕТЕОР-М» №2 за период с 01.06.2019 00:00 по 02.08.2019 00:00. Наличие данной зависимости позволяет заранее оценить приближенные значения потоков на последующих участках (витках) орбиты.

В будущем планируется более детально изучить зависимость в спокойные периоды для различных ин-

готной зависимости во время геомагнитных возмущений различной интенсивности, включая периоды максимальной солнечной и геомагнитной активности. Данные исследования необходимы для обеспечения надежного прогнозирования потоков заряженных частиц на низких полярных орбитах, что играет немаловажную роль при разработке будущих космических программ, включая запуск российской орбитальной служебной станции (РОСС) на низкую полярную орбиту, планируемый в ближайшие годы. Предполагаемые параметры орбиты РОСС (высота 372 км и наклонение 96.8°) подразумевают необходимость учета долготной зависимости потоков электронов внешнего РПЗ, полученные в данной работе.

- [1] *Friedel R., Reeves G.D., Obara T.* // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. **64**, 265 (2002).
- [2] *Paulikas G.A., Blake J.B.* // Geophys. Monogr. Ser. **21**, 180 (1979).
- [3] *Myagkova I.N., Panasyuk M.I., Denisov Yu.I.* et al. // Geomagnetism and Aeronomy. **51**, N 7. 897 (2011).
- [4] *Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю.* и др. Д // Астрон. вестн. Исследования солнечной системы. **41**, N 4. С. 350 (2007).
- [5] *Белов А.В., Дж. Виллорези* и др. // Геомагнетизм и аэронамия. **44**, 502 (2004).
- [6] *Iucci N., Levitin A., Belov E.* et al. // Space Weather. **3**. (2005).
- [7] *Kudela K.* // Journal of Physics: Conf. Series. **409**. (2013).
- [8] *Лонгейр М.* // Астрофизика высоких энергий. М.: Мир, 1983.
- [9] *Van Allen J.A.* // et Propulsion. **28**. 12 (1958).
- [10] *Вернов С.Н., Чудаков А.Н.* // УФН. **70**, №.4. 585 (1960).
- [11] *Allanson O., Tindale L., Bradley T.* // Astronomy & Geophysics. **70**, N4. 585 (2019).
- [12] *Арцимович Л.А.* // Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат, 1969.
- [13] *Van Rossum G. and Drake F.L.* // Python 3 Reference Manual. CreateSpace, 2009.
- [14] *Hunter J.D.* // Computing in Science & Engineering. **9**, N 3. 90 (2007).
- [15] *Harris C.R., Millman K.J., Stéfan J. van der Walt* et al. // Nature. **585**, N 7825. 357 (2020).
- [16] *da Costa-Luis, Casper O.* et al. // Journal of Open Source Software. **4**, N 137. 1277. (2019).
- [17] *Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A.* et al. // Journal of machine learning research. **12**. 2825 (2011).
- [18] *Wes McKinney* Data Structures for Statistical Computing in Python // Proceedings of the 9th Python in Science Conference. 56 (2010).
- [19] *Walker S.H., Duncan D.B.* et al. // Biometrika. **54**, N 1. 167 (1967).
- [20] *Alken P., Thebault E., Beggan C.D.* et al. // Earth Planets Space. **49**. 73 (2021).

Longitudinal dependence of the electron fluxes of the Earth's outer radiation belt according to Meteor-M2

A. O. Belova^{1,a}, I. N. Myagkova^{2,b}

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia.*

²*D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics
Moscow 119191, Russia*

E-mail: ^abelova.ao20@physics.msu.ru, ^birina@srd.sinp.msu.ru

The present work uses data from the Meteor-M2 satellite, which had a circular polar orbit and recorded electron fluxes in various energy ranges. To obtain the longitudinal dependence of the fluxes, data were taken for the period June–July 2019, corresponding to the minimum of solar and geomagnetic activity. To solve this problem, a program has been developed to automate the process of data analysis and determine the areas where the satellite passes the outer radiation belt of the Earth. The dependence of electron fluxes on longitude and the McIlwain parameter L was obtained, and a formula for converting fluxes from one longitude to another was derived, which allows calculating the values of fluxes in subsequent sections of the orbit.

PACS: 94.30.Xy

Keywords: electrons, Van Allen radiation belt, outer radiation belt, geomagnetically quiet period, longitudinal dependence.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Белова Анастасия Олеговна — студент; e-mail: belova.ao20@physics.msu.ru.

2. Мягкова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст, науч, сотрудник; e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.