

Научная статья

УДК 550.385: 551.590.2: 523.74

EDN [DSVZZT](#)

DOI 10.17150/2411-6262.2022.13(2).26

**Г.В. Попов***Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация,*
popov2898@mail.ru

АНАЛИЗ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ результатов корреляционной модели потоков электронов на геостационарной орбите и их соответствия физике магнитосферы и представлений о механизмах появления энергичных электронов на геостационарной орбите. Предложен вариант системного подхода к корреляционному анализу потоков электронов на ГО, в котором система «магнитосфера» представлена состоящей из трех вложенных в нее подсистем. Перспективность его дальнейшего развития подтверждается тем, что он позволяет объяснить наличие верхних пределов в расчетах коэффициентов корреляции и обнаруженные закономерности в рассчитанных временах задержек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Модель, корреляция, магнитосфера, ускорение электронов, геостационарная орбита, солнечная активность, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ. Дата поступления 8 апреля 2022 г.; дата принятия к печати 25 мая 2022 г.; дата онлайн-размещения 10 июня 2022 г.

Original article

G.V. Popov*Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation,* popov2898@mail.ru

ANALYSIS AND THEORETICAL INTERPRETATION OF THE CORRELATION MODEL OF ELECTRON FLUXES IN GEOSTATIONARY ORBIT

ABSTRACT. The article analyzes of results of the correlation model of electron fluxes in the geostationary orbit and their correspondence to the physics of the magnetosphere and the ideas about the mechanisms of the appearance of energetic electrons in the geostationary orbit. A variant of the system approach to the correlation analysis of electron fluxes on the GO is proposed, in which the «magnetosphere» system is represented by a system consisting of three subsystems embedded in it. The study confirms the prospects of its further development by the fact that it allows to explain the presence of upper limits in the calculations of correlation coefficients and the detected patterns in the calculated delay times.

KEYWORDS. Model, correlation, magnetosphere, acceleration of electrons, geostationary orbit, solar activity, solar wind, interplanetary magnetic field.

ARTICLE INFO. Received April 8, 2022; accepted May 25, 2022; available online June 10, 2022.

Введение

В работе [1] на основе многомерного корреляционного анализа построена статистическая модель связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности для 22 и 23 циклов солнечной активности. Такая модель необходима поскольку такие

© Попов Г.В., 2022

Baikal Research Journal

электронный научный журнал Байкальского государственного университета

электроны оказывают неблагоприятное воздействие на функционирование высокоорбитальных спутников [2–6]. Наиболее опасными являются повышенные потоки релятивистских электронов. Для прогнозирования опасных ситуаций интенсивно разрабатываются модели динамики потоков энергичных и релятивистских электронов на геостационарной орбите [7–11]. Большинство из них основаны на статистическом анализе связи потоков электронов с характеристиками солнечного ветра (СВ) и индексами геомагнитной активности. Эти характеристики и индексы выполняют роль входных параметров моделей (ниже будем называть их индикаторами).

Многочисленные статистические исследования [12–16] приводят к выводу, что всплески релятивистских электронов на геостационарной орбите (ГО) лучше всего коррелируют со скоростью солнечного ветра. Но как понять этот вывод? Ведь хорошо известно [17], что появление и развитие магнитосферных бурь контролируется скоростью солнечного ветра, его плотностью, а также величиной и направлением магнитного поля. В свою очередь, активность магнитосферных бурь и возмущенность магнитосферы в целом характеризуется геомагнитными индексами, но корреляция их с потоками релятивистских электронов на (ГО) не так значительна, как со скоростью СВ. Многие работы последних лет посвящены разгадке этого феномена [14; 18–20] и др.

Целью настоящей работы является провести анализ результатов, изложенных в [1], с позиции их соответствия физике магнитосферы и представлений о механизмах появления энергичных электронов на геостационарной орбите

Обсуждение результатов корреляционной модели [1]

1.1. Начнем с изложения основных теоретических представлений о цепочке процессов и механизмов, обеспечивающих связь параметров СВ с потоками электронов на ГО. Несмотря на то, что сводной и самосогласованной теоретической модели этой цепочки пока не создано, фрагменты ее разработаны весьма подробно, широко представлены в печати и вряд ли нуждаются в ссылках. Эти фрагменты мы будем использовать при интерпретации результатов нашего статистического анализа.

Названные процессы и механизмы делятся на две основные группы: механизмы, обеспечивающие поступление в магнитосферу потока энергии и частиц из СВ (назовем их пограничными), и механизмы ускорения частиц внутри магнитосферы (внутримагнитосферные).

В качестве теоретических моделей пограничных механизмов наибольшее признание получили две: пересоединение силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП) на магнитопаузе и неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. Обе они предполагают развитие плазменных неустойчивостей до нелинейного режима, обеспечивающих интенсивные взаимодействия «волна-частица» и, как следствие, «аномальные» значения коэффициентов переноса частиц и энергии. Теоретические исследования показывают, что первый механизм в основном контролируется компонентой B_z ММП, а второй — скоростью СВ (но зависит также от плотности СВ и, в меньшей степени, от ММП).

Динамика внутри-магнитосферных процессов в рассматриваемой нами цепочке делится на два этапа. Первый этап — генерация в хвосте магнитосферы (в околоземной части плазменного слоя) так называемых зародышевых («seed») электронов с энергиями от десятков до сотен кэВ в процессе развития магнитосферных бурь и суббурь. Экспериментальная информация о динамике и интенсивности этих процессов содержится в использованных нами выше геомагнитных индексах Dst, Kp, AE и PC. Второй этап — это перенос «seed» электронов вглубь магнитос-

феры (в том числе до ГО) и дополнительное их ускорение. Среди этих процессов есть как адиабатические дрейф и ускорение, так и диффузия в фазовом пространстве в результате резонансных взаимодействий электронов с электромагнитными волнами. Следует отметить, что для реализации первого этапа вполне достаточно развитие даже изолированной суббури и совсем не обязателен всплеск скорости СВ. Концепции двухэтапного ускорения ускорение электронов до релятивистских энергий придерживается большинство исследователей [12; 15; 21–23] и др.

1.2. Результаты анализа (см. [1] п. 5.1, рис. 3, 5 и 6) показывают, что наблюдается существенное различие в отклике низко-энергичных и релятивистских электронов на изменения индикаторов, что можно интерпретировать следующим образом. Низко-энергичные электроны — это результат реализации лишь первого этапа ускорения частиц; они не участвуют в дополнительном резонансном ускорении, контролируемом скоростью СВ. Поэтому, они хорошо коррелируют с геомагнитными индексами и плохо — со скоростью СВ. А для всплеска релятивистских электронов на ГО необходимым условием является значительное дополнительное ускорение на электромагнитных волнах, порожденных неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца. Вот почему для них преобладает корреляция со скоростью СВ.

Этот вывод поддерживают результаты, приведенные в [1] на рис. Так, рис. (b) наглядно показывает, что процесс переноса «seed» электронов на ГО без резонансного доускорения (энергии 50–225 КэВ) занимает очень мало времени. Наоборот, дополнительное ускорение (до энергий 315–1 500 КэВ) требует более суток. Различие функций распределения времен задержек на рис. (b) также указывает на различие механизмов переноса для низко- и высокоэнергичных электронов. Пороговая энергия, разделяющая два режима переноса, как и на рис. 3, 5 и 6, близка к –200 кэВ.

Рисунок (a) в работе [1] дает дополнительную информацию об особенностях резонансного ускорения «seed» электронов до релятивистских энергий. Верхняя панель показывает, что резонансное до-ускорение длится в среднем 2–3 суток, но при этом, как видно из нижней панели, при этом доускоряются «seed» электроны, сгенерированные раньше всплеска скорости СВ (процессы их генерации контролирует магнитный индекс K_p). Вместе с тем, видно, что «seed» электроны, порожденные, например, 30–40 ч назад (и таких случаев, как видно из нижней панели, значительно меньше), также успешно набирают релятивистские энергии (см. верхнюю панель). Малые времена задержки (0–10 и даже 20–30 ч обнаруживаются для электронов, уже участвующих в доускорении, инициированном предыдущими всплесками скорости СВ.

Результаты, показанные на средней панели рис. (a), позволяют сделать предположение, что в СВ сначала появляется всплеск скорости, а затем — увеличение плотности. Это означает, что с плотностью коррелируют потоки электронов, до-ускоренные предыдущим всплеском скорости.

Рисунок (a) дает дополнительную информацию об особенностях резонансного ускорения зародышевых электронов до релятивистских энергий. Верхняя панель показывает, что резонансное до-ускорение длится в среднем 2–3 сут, но при этом, как видно на нижней панели, до-ускоряются зародышевые электроны, сгенерированные раньше всплеска скорости СВ (процессы их генерации контролирует магнитный индекс K_p).

Вместе с тем видно, что зародышевые электроны, порожденные, например, 30–40 ч назад (и таких случаев, как видно на нижней панели, значительно меньше), также успешно набирают релятивистские энергии (см. верхнюю панель). Малое время задержки (0–10 и даже 20–30 ч) обнаруживается для электронов, уже участвующих в до-ускорении, инициированном предыдущими всплесками скорости СВ.

1.3. В разделе 3.1. работы [1], для расширенного временного интервала был подтвержден вывод [21; 22] о том, что основной особенностью вариаций эффективности связи потоков энергичных электронов с параметрами СВ (скоростью и плотностью) и с индексами геомагнитной активности является высокая корреляция в периоды конца спада солнечной активности и в минимуме цикла и низкая корреляция в годы максимумов солнечной активности. Нет сомнения, что этот эффект связан со структурными изменениями в СВ в течение солнечного цикла.

Действительно, на поздней фазе спада и в минимуме солнечного цикла в СВ преимущественно наблюдаются высокоскоростные рекуррентные потоки солнечного ветра, эмитированные из транс-экваториальных корональных дыр [24]). В период максимума солнечной активности в солнечном ветре преобладают спорадические выбросы корональной массы (CME) [25].

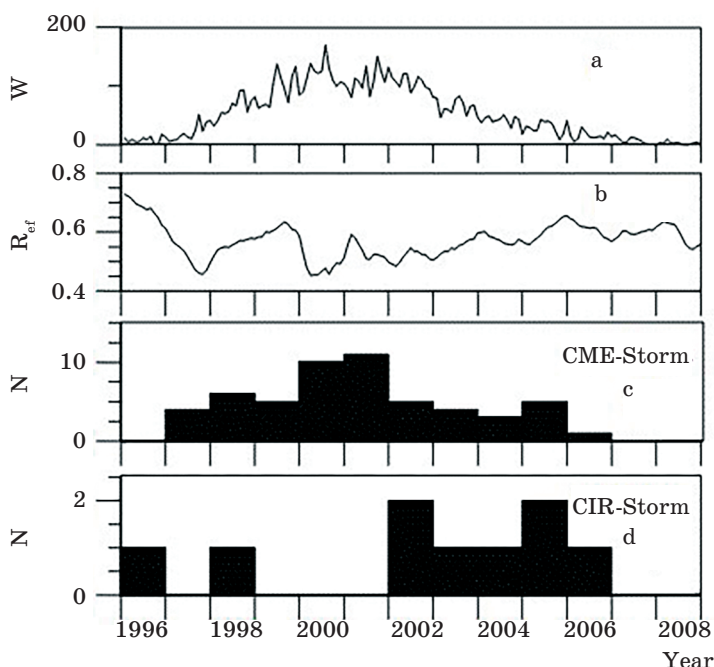


Рис. (а) Изменения числа солнечных пятен, (б) корреляция потоков электронов с энергией $E > 2$ MeV и скоростью солнечного ветра, (с) число магнитных бурь, связанных с CMEs* and CIRs* (d) число число магнитных, связанных с CIR

На рис. (с, d) показано число появлений случаев магнитных бурь (МБ), связанных с CME и CIR (CME-МБ и CIR-МБ, соответственно) для периода между 1996 и 2008 гг. (адаптировано из [26]). Здесь же на панели (б) показаны рассчитанные нами вариации R_{ef} для связи потоков электронов на ГО (энергии более 2 МэВ) и скоростью СВ. Видно, что случаи CME-МБ наиболее часты в максимуме солнечного цикла. С появлением CME-бурь в 1997 г. отмечается резкое уменьшение R_{ef} . Уменьшение R_{ef} наблюдается и в 2000–2001 гг., когда количество спорадических CME-МБ увеличивается. С началом фазы спада происходит уменьшение количества CME-МБ и увеличение R_{ef} . Рекуррентные потоки (CIR-случаи), напротив, соответствуют повышению эффективности связи электронов со скоростью СВ. Так в 1996 г. имеется высокий уровень связи потоков со скоростью СВ. Создается впечатление, что рекуррентные

потоки способствуют формированию временного профиля потоков электронов на ГО, более подобного временному профилю скорости СВ. При увеличении солнечной активности появляются спорадические потоки, пространственная структура которых (профиль скорости и плотности) отличается от рекуррентных и которые «хаотизируют» процессы до-ускорения «seed» электронов, приводя к уменьшению R_{ef} .

Создается впечатление, что рекуррентные потоки способствуют формированию временного профиля потоков электронов на ГО подобному временному профилю скорости СВ. При увеличении солнечной активности появляются спорадические потоки, пространственная структура которых (профиль скорости и плотности) отличается от рекуррентных и которые «хаотизируют» процессы доускорения зародышевых электронов, приводя к уменьшению R_{ef} .

1.4. Все обсуждаемые результаты были получены в [1] с использованием корреляционного анализа временных рядов экспериментальных данных. Поэтому представляет интерес обсудить особенности применения этого аппарата к нашей задаче моделирования всплесков потоков электронов на ГО. В принципе, корреляционный анализ двух временных рядов каких-либо величин дает лишь количественную оценку сходства временных профилей этих величин. Так, достаточно высокий коэффициент корреляции между потоками релятивистских электронов и скоростью СВ ($R_{ef} = 0,6-0,7$) в период поздней фазы спада и минимума солнечной активности говорит о сходстве временных профилей скорости СВ и потоков релятивистских электронов, но не о наличии причинно-следственной их связи. Эту связь мы фактически постулируем (см. п. 1.1). Такое постулирование является общепринятым, за исключением, может быть, работы [22], в которой предполагается, что это сходство является случайным фактором, что временные профили скорости СВ и потоков J релятивистских электронов на ГО формируются совершенно различными и не связанными между собой механизмами.

Но если между V и J существует цепочка причинно-следственных связей (см. п. 1.1), то почему $R_{ef}(V, J)$ не принимает значения, более близкие к единице, почему связь (корреляция) низко-энергичных электронов ($E < 100-200$ кэВ) с геомагнитными индексами лучше, чем с параметрами СВ, а у релятивистских частиц — наоборот? Мы считаем, что эти (и другие) результаты, приведенные выше в п. 3, хорошо укладываются в следующую схему.

Всплеск (импульс) скорости или плотности СВ будем рассматривать как некий сигнал, поступающий в систему «магнитосфера», состоящую из вложенных в нее подсистем, каждая из которых характеризуется своей «передаточной функцией» и своим характерным временем реакции (отклика) на внешнее воздействие.

Первая подсистема — это магнитопауза. На ней развиваются неустойчивости и динамика преобразования входного сигнала определяется порогом этих неустойчивостей. Входной сигнал из механического (импульс скорости) преобразуется в электромагнитный. При этом возможно запаздывание сигнала и его деформация, определяемая его сверткой с характерными временами развития неустойчивостей и их перехода в нелинейный режим.

Вторая подсистема — это ближняя к Земле кромка плазменного слоя, где генерируются «seed» — электроны. Известно [17], что характерные времена активизации этой подсистемы от внешнего сигнала составляют примерно 5 мин. (микросуббури_ и 2 ч (суббури)). Это небольшие, для нашего рассмотрения, запаздывания, но существенным при этом является «размножение и дискретизация» отклика — возникают дуги микроинжекций электронов, длящиеся в некоторых случаях до нескольких суток (магнитосферная буря). К этой подсистеме мы отнесем «seed» — электроны, квази-адиабатически дрейфующие к ГО — они после дрейфа составят низко-энергичную часть ($E < 200$ КэВ) ее популяции.

Динамика этой низко-энергичной части фактически мало зависит от первой подсистемы и определяется развитием внутри-магнитосферных трехмерных токовых систем, которое отражается в геомагнитных индексах. Следовательно, эти индикаторы и являются преобладающими. Третья подсистема — это внешняя магнитосфера с ее электромагнитными резонансами и дрейфующими «seed»- электронами. Магнитосферные резонансы, возбужденные процессами на магнитопаузе (первая подсистема) обеспечивают дополнительное ускорение (второй этап) «seed»- электронов до релятивистских энергий. Исходный сигнал (импульс скорости СВ), испытывает еще одну трансформацию — появляется всплеск потоков энергичных электронов (в том числе, со значительным запаздыванием, на ГО). В этой третьей подсистеме «seed»- электроны из второй подсистемы играют второстепенную и «хаотизирующую» роль в динамике сигнала из-за того, что они представлены в виде цугов. Эта хаотизация — основная причина ухудшения коррелятивной связи всплеска энергичных электронов с геомагнитными индексами. Она же, с учетом нелинейности процессов в первой и третьей подсистемах, позволяет понять, почему $R_{ef}(V, J)$ не превышает значений — 0,6–0,7 и почему статистика задержек всплесков энергичных электронов на ГО (см. рис.) имеет вид, характерный для случайных процессов.

1.5. Результаты, приведенные в [1], не дают прямого ответа на вопрос, какие индикаторы являются наилучшими при моделировании возмущений потоков электронов на ГО. Оказывается, что эффективность индикаторов достаточно сложным образом зависит и от энергии рассматриваемых электронов, и от солнечной активности (структуры солнечного ветра). Вместе с тем, наши результаты дают вполне определенные указания на то, что для электронов с энергией менее — 100–200 кэВ наилучшими индикаторами являются геомагнитные индексы Кр и АЕ. Это и понятно, поскольку электроны этих энергий образуются в результате одноэтапных (см. п. 1.1) внутримангитосферных возмущений, сопровождаемых интенсификацией трехмерных токовых система.

Для электронов с энергией около 300 кэВ и выше (двухэтапные процессы) лучшим индикатором становится скорость солнечного ветра, а вторым по значимости — его плотность. При этом, что в цикле солнечной активности скорость как индикатор лучше в периоды перед максимумом, в максимуме и на поздней фазе спада солнечного цикла, а плотность — в начале подъема и на спаде солнечного цикла. Анализ эффективности индикаторов по трехмесячным временным интервалам позволил выделить «V-, n-, и m- случаи» преобладания, соответственно, скорости СВ, плотности СВ и геомагнитных индексов. В среднем, для «m-случаев» регистрируется более высокая геомагнитная активность и, при примерно равной скорости СВ, большая его плотность и большая величина отрицательной V_z компоненты ММП, чем для «V-случаев».

Эти результаты являются предварительными и стимулируют проведение более подробных исследований (в том числе на малых временных интервалах) влияния структуры солнечного ветра на эффективность различных индикаторов.

Выводы

Ускорение электронов до релятивистских энергий происходит в два этапа, причем второй из них сопровождается возбуждением магнитосферных резонансов, непосредственно связанным с параметрами солнечного ветра.

Предложен предварительный вариант системного подхода к корреляционно-му анализу потоков электронов на ГО, в котором система «магнитосфера» представлена состоящей из трех вложенных в нее подсистем. Перспективность его дальнейшего развития подтверждается тем, что он позволяет объяснить наличие верхних пределов в расчетах коэффициентов корреляции и обнаруженные закономерности в рассчитанных временах задержек.

Список использованной литературы

1. Попов Г.В. Эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в 22 и 23 солнечных циклах / Г.В. Попов, В.И. Дегтярев, С.Э. Чудненко // Солнечно-земная физика. — 2013. — № 23. — С. 64–74.
2. Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure / D.N. Baker, J.H. Allen, S.G. Kanekal, G.D. Reeves. — DOI 10.1029/98EO00359 // Eos, Transactions, American Geophysical Union. — 1998. — Vol. 79, no. 40. — P. 477–483.
3. Spacecraft charging: observations and relationship to satellite anomalies / J.F. Fennell, H.C. Koons, J.L. Roeder, J.B. Blake // 7th Spacecraft Charging and Technology Conference, ESA SP-476. — Los Angeles, 2001. — P. 279–286.
4. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности : справочное пособие / Н.А. Заболотная. — Москва : URSS, 2007. — 88 с.
5. Space Weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits / N. Iucci, A.E. Levitin, A.V. Belov [et al.]. — DOI 10.1029/2003SW000056 // Space Weather. — 2005. — Vol. 3, iss. 1. — S01001.
6. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов / Н.В. Романова, В.А. Пилипенко, Н.В. Ягова, А.В. Белов // Космические исследования. — 2005. — Т. 43, № 3. — С. 186–193.
7. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements / X. Li, M. Temerin, D.N. Baker [et al.] // Geophysical Research Letters. — 2001. — Vol. 28, no. 9. — P. 1887–1890.
8. Modeling the deep penetration of outer belt electrons during the “Halloween” magnetic storm in 2003 / X. Li, A.B. Barker, D.N. Baker [et al.]. — DOI 10.1029/2008SW000418 // Space Weather. — 2009. — Vol. 7. — S02004.
9. Garret H.B. Influence of solar wind variability on geomagnetic activity / H.B. Garret, A.J. Dessler, T.W. Hill // Journal of Geophysical Research. — 1974. — Vol. 79, no. 31. — P. 4603–4610.
10. Xue B.S. Study of the enhancement events of relativistic electron at the geosynchronous orbit / B.S. Xue // Chinese Journal of Space Science. — 2005. — Vol. 25, iss. 5. — P. 383–386.
11. Degtyar Prediction of maximal daily average values of relativistic electron fluxes in geostationary orbit during the magnetic storm recovery phase / V.I. Degtyarev, S.E. Chudnenko, I.P. Kharchenko [et al.]. — DOI 10.1134/S0016793209080349 // Geomagnetism and Aeronomy. — 2009. — Vol. 49, no. 8. — P. 1208–1217.
12. Strong electron acceleration in the Earth’s magnetosphere / D.N. Baker, X. Li, J.B. Blake, S. Kanekal // Advances Space Research. — 1998. — Vol. 21. — P. 609–613.
13. Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit / T.P. O’Brien, R.L. McPherron, D. Sornette, G.D. Reeves. — DOI 10.1029/2001JA000052 // Journal of Geophysical Research Atmospheres. — 2001. — Vol. 106, no. A8. — P. 15533–15544.
14. Li X. The electron radiation belt / X. Li, M.A. Temerin // Space Science Reviews. — 2001. — Vol. 95. — P. 569–580.
15. Energetic electrons, 50 keV to 6 MeV, at geosynchronous orbit: their responses to solar wind variations / X. Li, D.N. Baker, M. Temerin [et al.]. — DOI 10.1029/2004SW000105 // Space Weather. — 2005. — Vol. 3. — S04001.
16. Input parameters for models of energetic electrons fluxes at the geostationary orbit / V.I. Degtyarev, G.V. Popov, B.S. Xue, S.E. Chudnenko // Journal of Space Science. — 2005. — Vol. 25, iss. 5. — P. 424–429.
17. Плазменная гелиофизика / ред. Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский. — Москва : Физматлит, 2008. — Т. 2. — 560 с.
18. Lyatsky W. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit / W. Lyatsky, G.V. Khazanov. — DOI 10.1029/2007GL032524 // Geophysical Research Letters. — 2008. — Vol. 35. — L03109.
19. Lyatsky W. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit / W. Lyatsky, G.V. Khazanov. — DOI 10.1029/2008JA013048 // Journal Geophysical Research. — 2008. — Vol. 113. — A08224.

20. Kellerman A.C. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt / A.C. Kellerman, Y.Y. Shprits. — DOI 10.1029/2011JA017253 // *Journal Geophysical Research*. — 2012. — Vol. 117. — A05217.

21. Mann I.R. Correlations between ULF wave power, solar wind speed, and relativistic electron flux in the magnetosphere: Solar cycle dependence / I.R. Mann, T.P. O'Brien, D.K. Milling // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2004. — Vol. 66, no. 2. — P. 187–198.

22. Потапов А.С. Связь потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите с уровнем УНЧ-активности на поверхности Земли и в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности / А.С. Потапов, Б. Цэгмэд, Л.В. Рыжакова // *Космические исследования*. — 2012. — Т. 50, № 2. — С. 130–146.

23. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves / R.B. Horne, R.M. Thorne, S.A. Glauert [et al.]. — DOI 10.1029/2004JA010811 // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — Vol. 110. — A03225.

24. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTEP coordinated measurements / D.N. Baker, X. Li, N. Turner [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. — 1997. — Vol. 102, no. A7. — P. 14141–14148.

25. Baker D.N. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere / D.N. Baker, S.G. Kanekal, J. Blake // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2008. — Vol. 70. — P. 195–206.

26. Miyoshi Y. Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences / Y. Miyoshi, R. Kataoka // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2011. — Vol. 73, no. 1. — P. 77–87.

References

1. Popov G.V., Degtyarev V.I., Chudnenko S.E. Correlation of energetic electron fluxes at geostationary orbit with solar wind parameters and geomagnetic activity indices during solar cycles 22 and 23. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 2013, no. 23, pp. 64–74. (In Russian).

2. Baker D.N., Allen J.H., Kanekal S.G., Reeves G.D. Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1998, vol. 79, no. 40, pp. 477–483. DOI: 10.1029/98EO00359.

3. Fennell J.F., Koons H.C., Roeder J.L., Blake J.B. Spacecraft Charging: Observations and Relationship to Satellite Anomalies. *7th Spacecraft Charging and Technology Conference, ESA SP-476*. Los Angeles, 2001, pp. 279–286.

4. Zabolotnaja N.A. *Indices of Geomagnetic Activity*. Moscow, URSS Publ., 2007. 88 p.

5. Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. (et al.). Space Weather Conditions and Spacecraft Anomalies in Different Orbits. *Space Weather*, 2005, vol. 3, iss. 1. S01001. DOI: 10.1029/2003SW000056.

6. Romanova N.V., Pilipenko V.A., Yagova N.V., Belov A.V. Statistical Correlation of the Rate of Failures on Geosynchronous Satellites with Fluxes of Energetic Electrons and Protons. *Kosmicheskie issledovaniya = Cosmic Research*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 186–193. (In Russian).

7. Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D., Larson D. Quantitative Prediction of Radiation Belt Electrons at Geostationary Orbit Based on Solar Wind Measurements. *Geophysical Research Letters*, 2001, vol. 28, no. 9, pp. 1887–1890.

8. Li X., Barker A.B., Baker D.N., Tu W.S., Sarris T.E., Selesnik R.S., Friedel R., Shen C. Modeling the Deep Penetration of Outer Belt Electrons During the “Halloween” Magnetic Storm in 2003. *Space Weather*, 2009, vol. 7. S02004. DOI: 10.1029/2008SW000418.

9. Garret H.B., Dessler A.J., Hill T.W. Influence of Solar Wind Variability on Geomagnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 1974, vol. 79, no. 31, pp. 4603–4610.

10. Xue B.S. Study of the Enhancement Events of Relativistic Electron at the Geosynchronous Orbit. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, vol. 25, iss. 5, pp. 383–386.

11. Degtyarev V.I., Chudnenko S.E., Kharchenko I.P., Tsegmed D., Xue B. Prediction of Maximal Daily Average Values of Relativistic Electron Fluxes in Geostationary Orbit During the Magnetic Storm Recovery Phase. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, vol. 49, no. 8, pp. 1208–1217. DOI: 10.1134/S0016793209080349.

12. Baker D.N., Li X., Blake J.B., Kanekal S. Strong Electron Acceleration in the Earth's Magnetosphere. *Advances Space Research*, 1998, vol. 21, pp. 609–613.
13. O'Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D., Reeves G.D. Which Magnetic Storms Produce Relativistic Electrons at Geosynchronous Orbit. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, vol. 106, no. A8, pp. 15533–15544. DOI: 10.1029/2001JA000052.
14. Li X., Temerin M.A. The Electron Radiation Belt. *Space Science Reviews*, 2001, vol. 95, pp. 569–580.
15. Li X., Baker D.N., Temerin M., Reeves G., Friedel R., Shen C. Energetic Electrons, 50 keV to 6 MeV, at Geosynchronous Orbit: Their Responses to Solar Wind Variations. *Space Weather*, 2005, vol. 3, S04001. DOI: 10.1029/2004SW000105.
16. Degtyarev V.I., Popov G.V., Xue B.S., Chudnenko S.E. Input Parameters for Models of Energetic Electrons Fluxes at the Geostationary Orbit. *Journal of Space Science*, 2005, vol. 25, iss. 5, pp. 424–429.
17. Zelenyj L.M., Veselovskij I.S. (eds). *Plasma Heliophysics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. Vol. 2. 560 p.
18. Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of Solar Wind Density on Relativistic Electrons at Geosynchronous Orbit. *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35. L03109. DOI: 10.1029/2007GL032524.
19. Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of Geomagnetic Disturbances and Solar Wind Density on Relativistic Electrons at Geostationary Orbit. *Journal Geophysical Research*, 2008, vol. 113. A08224. DOI: 10.1029/2008JA013048.
20. Kellerman A.C., Shprits Y.Y. On the Influence of Solar Wind Conditions on the Outer-electron Radiation Belt. *Journal Geophysical Research*, 2012, vol. 117. A05217. DOI: 10.1029/2011JA017253.
21. Mann I.R., O'Brien T.P., Milling D.K. Correlations between ULF Wave Power, Solar Wind Speed, and Relativistic Electron Flux in the Magnetosphere: Solar Cycle Dependence. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, vol. 66, no. 2, pp. 187–198.
22. Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. Relationship between the fluxes of relativistic electrons at geosynchronous orbit and the level of ULF activity on the Earth's surface and in the solar wind during the 23rd solar activity cycle. *Kosmicheskie issledovaniya = Cosmic Research*, 2012, vol. 50, no. 2, pp. 130–146. (In Russian).
23. Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., Albert J., Meredih N., Anderson R. Timescale for Radiation Belt Electron Acceleration by Whistler Mode Chorus Waves. *Journal of Geophysical Research*, 2005, vol. 110. A03225. DOI: 10.1029/2004JA010811.
24. Baker D.N., Li X., Turner N., Blake J.B., Sheldon R.B., Spence H.E. Recurrent Geomagnetic Storms and Relativistic Electron Enhancements in the Outer Magnetosphere: ISTP Coordinated Measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, vol. 102, no. A7, pp. 14141–14148.
25. Baker D.N., Kanekal S.G., Blake J. Solar Cycle Changes, Geomagnetic Variations, and Energetic Particle Properties in the Inner Magnetosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, vol. 70, pp. 195–206.
26. Miyoshi Y., Kataoka R. Solar Cycle Variations of Outer Radiation Belt and its Relationship to Solar Wind Structure Dependences. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, vol. 73, no. 1, pp. 77–87.

Информация об авторе

Попов Георгий Васильевич — доктор физико-математических наук, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, popov2898@mail.ru, SPIN-код: 3979-6755, AuthorID РИНЦ: 58756.

Author

George V. Popov — D.Sc. in Physics and Mathematics, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, popov2898@mail.ru, SPIN-Code: 3979-6755, AuthorID RSCI: 58756.

Для цитирования

Попов Г.В. Анализ и теоретическая интерпретация корреляционной модели потоков электронов на геостационарной орбите / Г.В. Попов. — DOI 10.17150/2411-6262.2022.13(2).26. — EDN [DSVZZT](#) // *Baikal Research Journal*. — 2022. — Т. 13, № 2.

For Citation

Popov G.V. Analysis and Theoretical Interpretation of the Correlation Model of Electron Fluxes in Geostationary Orbit. *Baikal Research Journal*, 2022, vol. 13, no. 2. (In Russian). EDN: [DSVZZT](#). DOI: 10.17150/2411-6262.2022.13(2).26.