

**РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА
И МЕТОДЫ ИХ ПРОГНОЗА (ОБЗОР)****RELATIVISTIC ELECTRONS OF THE OUTER RADIATION BELT
AND METHODS OF THEIR FORECAST (REVIEW)****А.С. Потапов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru***A.S. Potapov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

Аннотация. В статье дан обзор исследований по динамике релятивистских электронов в области геосинхронной орбиты. Перечислены физические процессы, которые приводят к ускорению электронов, заполняющих внешний радиационный пояс. Являясь одним из факторов космической погоды, потоки высокоэнергичных электронов представляют серьезную угрозу для функционирования спутниковой аппаратуры в одной из наиболее заселенных орбитальных областей. Подчеркнута необходимость усилий по разработке методов прогноза радиационной обстановки в этой части магнитосферы, перечислены возможные предикторы и дана их классификация. Приведен пример прогностической модели для предсказания потока релятивистских электронов с заблаговременностью 1–2 сут. Обсуждаются некоторые вопросы практической организации прогнозирования, перечислены основные задачи краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозов.

Ключевые слова: радиационные пояса, релятивистские электроны, прогноз, магнитосфера, солнечный ветер.

Abstract. The paper reviews studies of the dynamics of relativistic electrons in the geosynchronous region. It lists the physical processes that lead to the acceleration of electrons filling the outer radiation belt. As one of the space weather factors, high-energy electron fluxes pose a serious threat to the operation of satellite equipment in one of the most populated orbital regions. Necessity is emphasized for efforts to develop methods of forecasting the situation in this part of the magnetosphere, possible predictors are listed, and their classification is given. An example of a predictive model for forecasting relativistic electron flux with a lead time of 1–2 days is proposed. Some questions of practical organization of prediction are discussed; the main objectives of short-term, medium-term, and long-term forecasts are listed.

Keywords: radiation belts, relativistic electrons, forecast, magnetosphere, solar wind.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из первых научных достижений начала космической эры было обнаружение в 1958 г. Дж. Ван Алленом и группами С.Н. Вернова и В.И. Красовского радиационных поясов Земли [Темный, 1993]. Именно В.И. Красовский первым предположил, что зарегистрированные на третьем советском спутнике электроны не достигали плотной атмосферы потому, что были захвачены магнитным полем Земли. Это открытие привело к формированию полноценного научного направления, изучающего динамику потоков энергичных частиц в геомагнитном поле. С одной стороны, перманентное наличие потоков заряженных частиц в магнитосфере является важнейшей характеристикой ее состояния, а с другой — радиационные пояса могут создавать серьезную угрозу для пилотируемых космических аппаратов, направляющихся к Луне, и мешать нормальной работе спутниковой аппаратуры.

Считается, что в земной магнитосфере имеется два постоянно существующих радиационных пояса: внутренний, образуемый в основном протонами, и внешний, заселенный энергичными электронами. Такое разделение в значительной мере условно, поскольку, например, на магнитной оболочке $L=1.2$ –

1.5 существует стабильный пояс электронов с энергией $E>20$ МэВ [Гальпер и др., 1983]. Положение максимума потока протонов зависит от их энергии и сдвигается от $L=1.5$ до $L=3$ при уменьшении энергии от 100 МэВ до 1 МэВ. Пик интенсивности электронных потоков почти для всего диапазона энергий (от 40 кэВ до 2 МэВ) располагается в интервале магнитных оболочек $L=5$ –6. На высоте геосинхронной орбиты концентрация электронов с энергией около 1 МэВ на три порядка превышает концентрацию протонов той же энергии, что сохраняет примерно равной плотность энергии этих частиц [Borovsky et al., 2016]. По наблюдениям геосинхронных спутников, энергетический спектр электронов в диапазоне от 50 кэВ до 1.5 МэВ подчиняется степенному закону; показатель степени может меняться в широких пределах — от -6 до -2 [Freeman et al., 1998; Xiao et al., 2008].

В данном обзоре мы ограничимся ролью радиационных поясов в формировании космической погоды. В англоязычной литературе высокоэнергичные электроны внешнего радиационного пояса называют электронами-убийцами (killer electrons). Почему релятивистские электроны являются угрозой? Сорок процентов всех околоземных спутников находится на геосинхронной орбите, т. е. во внешней

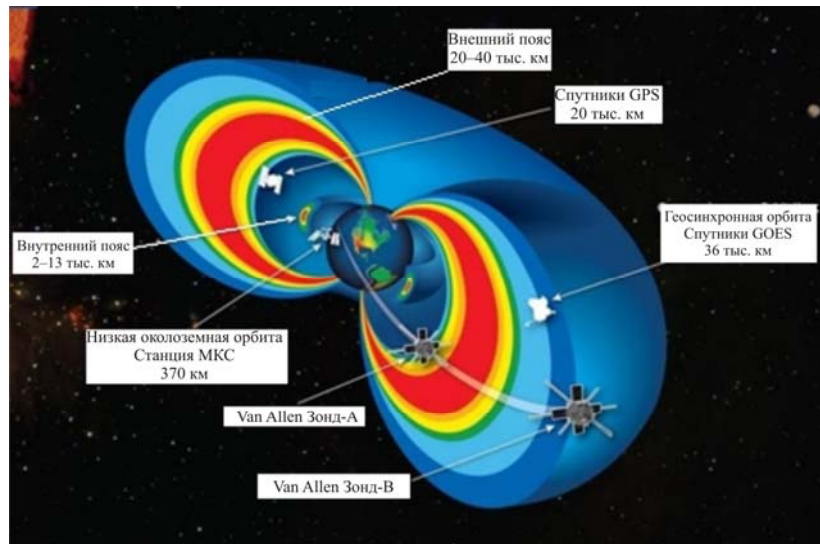


Рис. 1. Расположение радиационных поясов и орбиты различных космических аппаратов [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRReelY4NuZm-hTm8qUT6aNuKZ53jtpcCd8e06d-pL88X2DVNZw]

части внешнего радиационного пояса. Они выполняют коммуникационные, навигационные, разведывательные и другие функции. Релятивистские электроны могут вызвать глубокий диэлектрический заряд спутников и вывести их из строя или привести к сбою в работе. Кроме того, энергичные заряженные частицы вызывают деградацию солнечных батарей на космических аппаратах и импульсные помехи в системах сбора и передачи данных. На рис. 1 показаны расположение радиационных поясов и орбиты различных космических аппаратов.

Все это приводит к потребности прогнозировать поведение релятивистских электронов на геосинхронной орбите. Одним из первых, кто обратил внимание на опасности, кроющиеся в усилении внешнего радиационного пояса, является Д.Н. Бейкер [Baker et al., 1987; Baker, 2000, 2001; Baker et al., 1998, 2001]. В нашей стране большой цикл работ по исследованию влияния потоков энергичных частиц на работу космических аппаратов был выполнен в Институте физики Земли РАН В.А. Пилипенко и Н.В. Романовой [Пилипенко, Романова, 2005; Романова и др., 2005; Piliipenko et al., 2006; Romanova, Piliipenko, 2009; Романова и др., 2009]. В последние годы опубликовано множество работ, посвященных различным способам прогноза внезапных усилений потока заряженных частиц в радиационных поясах. Прежде всего, было выяснено, что заселенность внешнего пояса энергичными электронами нарастает при погружении земной магнитосферы в высокоскоростные потоки солнечного ветра, вызывающие к тому же магнитные бури на Земле [Paulikas, Blake, 1979; Mathie, Mann, 2001; Miyoshi, Kataoka, 2005, 2008; Reeves et al., 2013]. Однако только половина магнитных бурь приводит к усилению внешнего радиационного пояса [Reeves et al., 2003]. Остальные либо сохраняют интенсивность пояса на добурином уровне, либо даже приводят к ослаблению потоков электронов. Следовательно, помимо процессов, связанных с магнитными возмущениями, к пополнению радиационных поясов имеют отношение другие процессы. Исключительная сложность

взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, результатами которого являются ускорение заряженных частиц и пополнение ими радиационных поясов, ведет к многофакторности зависимости релятивистских потоков от состояния межпланетной среды и магнитосферы. При этом такая зависимость оказывается неоднозначной, что еще затрудняет развитие методов прогноза радиационных поясов.

Данный обзор посвящен описанию современного уровня знаний лишь об одной стороне проблемы радиационных поясов, а именно о динамике высокоэнергичной электронной составляющей внешнего радиационного пояса, проявляющейся по измерениям на геосинхронной орбите, а также методам прогноза потоков релятивистских электронов, предложенным к настоящему времени. Сначала мы дадим обзор основных характеристик внешнего радиационного пояса, потом обсудим его динамику во время геомагнитных возмущений. Далее опишем имеющиеся подходы к прогнозированию потоков электронов, обсудим выбор предикторов для такого прогноза и, наконец, приведем пример прогностической модели, позволяющей оценивать потоки релятивистских электронов с заблаговременностью 1–2 сут.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

1.1. Источники и стоки энергии

Состояние внешнего радиационного пояса, т. е. интенсивность потоков, плотность частиц электронной компоненты, является результатом динамического равновесия между источниками частиц и потерями электронов за счет различных процессов. И те, и другие крайне разнообразны, что еще более затрудняет прогноз потоков заряженных частиц. Источники частиц можно разбить на две группы: первичные, обеспечивающие поступление низкоэнергичных электронов (менее 10 кэВ), и вторичные,

которыми являются процессы ускорения электронов до релятивистских энергий (более 1 МэВ). К первичным источникам относят такие, как захват частиц из межпланетной среды при смещениях магнитопаузы во время внезапных обжатий магнитосферы солнечным ветром [Тверской, 1964], инжекция частиц из геомагнитного хвоста в область захваченной радиации [Тверской, 1968] и перенос заряженных частиц в магнитосфере при диффузии под действием нестационарных электрических полей [Parker, 1960; Schulz, Lanzerotti, 1974].

Практически все вторичные источники, описываемые в литературе, связаны со стохастическим радиальным переносом дрейфующих электронов на более близкие к Земле магнитные оболочки за счет взаимодействия волна–частица, однако механизмы такого взаимодействия предлагаются самые разные [Schulz, Lanzerotti, 1974; Brautigam, Albert, 2000; Ozeke et al., 2014]. Часто упоминается модель рециркуляции [Fujimoto, Nishida, 1990]: медленная диффузия электронов поперек магнитных оболочек на низких высотах под действием флуктуаций электрического поля с квазипериодом 1 с и интенсивностью в несколько десятков милливольт на метр, что сравнимо с амплитудой геомагнитных пульсаций в высоких широтах. Эта модель неоднократно дополнялась другими механизмами, к примеру, в работе [Ukhorskiy et al., 2014] предлагается включить в модель учет бифуркаций дрейфовых орбит, что на порядок увеличивает скорость радиального дрейфа и усиливает наращивание энергии при больших значениях питч-угла частиц в экваториальной области. Драйверами ускорения, теми волнами, с которыми взаимодействуют ускоряющиеся электроны, могут быть как длиннопериодные УНЧ-колебания типа Pc4–Pc5 [Elkington et al., 1999; Hudson et al., 2000; Mathie, Mann, 2001; Губарь, 2010], так и волны в диапазоне ОНЧ [Horne, Thorne, 1998; Summers et al., 2007; Simms et al., 2015]. УНЧ-колебания ускоряют электроны за счет дрейфово-резонансного механизма, когда период дрейфа частиц вокруг Земли совпадает с периодом УНЧ-колебаний [Elkington et al., 1999]. Время оборота релятивистских заряженных частиц вокруг Земли (в минутах) равно [Кузнецов, 2010]

$$\tau = \frac{88(1 + E/E_0) K}{2 + E/E_0} \frac{K}{LE},$$

где $K=1.25-0.25\cos^2\lambda_m$. Здесь E — энергия частиц (в МэВ), E_0 для электронов составляет 0.51 МэВ, λ_m — геомагнитная широта точки отражения. Для электронов с энергией $E \sim 2$ МэВ время оборота $\tau \sim 5-7$ мин, это диапазон геомагнитных пульсаций Pc5.

В свою очередь, свистовые моды ОНЧ-излучений могут попадать в резонанс с гирочастотой электронов и ускорять их за счет электронно-циклотронной неустойчивости [Li et al., 2005]. Многие авторы считают, что имеет место одновременное ускорение электронов до релятивистских скоростей благодаря двойному эффекту от УНЧ- и ОНЧ-колебаний [O'Brien et al., 2003; Li et al., 2005; Roeder et al., 2005].

Однако те же колебания, в зависимости от конкретных условий, могут приводить и к спаду потока

энергичных электронов в радиационном поясе, забирая у частиц энергию или переводя электроны в конус потерь, т. е. они могут выступать и в качестве одного из каналов стока энергии радиационного пояса [Roeder et al., 2005]. Известен случай [Shprits et al., 2016], когда ионно-циклотронные волны приводили к увеличению популяции релятивистских электронов с энергиями около 1 МэВ и одновременно к уходу в конус потерь ультра-релятивистских электронов с энергией выше 4 МэВ. Другими причинами понижения потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите являются: 1) потери частиц на магнитопаузе и 2) «вздутие» дрейфовых орбит электронов под действием возросшего поля кольцевого тока [Ukhorskiy et al., 2015]. Оба процесса обычно имеют место во время главной фазы геомагнитной бури.

Упомянем также экзотические модели, привлекающие к объяснению динамики внешнего радиационного пояса релятивистские электроны юпитерианского происхождения [Baker et al., 1979] и электроны солнечного ветра, проникающие через касп [Sheldon et al., 1998].

1.2. Поведение радиационного пояса во время возмущений

Магнитные бури значительно меняют состояние электронного пояса, опустошая или наполняя его [Friedel et al., 2002; Reeves et al., 2003]. Однако лишь половина бурь приводит к итоговому усилению потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите. На рис. 2 показано типичное поведение потоков энергичных электронов J_{el} во время магнитосферной бури, полученное методом наложения эпох для 31 магнитной бури. Все эти бури были вызваны воздействием на магнитосферу коротящихся областей взаимодействия (КОВ, или CIR) быстрого и медленного солнечного ветра [Potapov, 2013]. За 0-эпоху принят момент контакта фронта КОВ-потока солнечного ветра с магнитопаузой.

Внезапный провал потока электронов на начальной фазе бури объясняется упоминавшимся выше воздействием резко усиливающегося во время бури поля кольцевого тока, причем для геосинхронной орбиты основную роль играют потери частиц на магнитопаузе [Ukhorskiy et al., 2015]. Электроны в ходе своего азимутального дрейфа оказываются вне последней замкнутой дрейфовой оболочки и пересекают приближившуюся к Земле магнитопаузу, уходя в межпланетную среду [Turner et al., 2012; Kessel, 2016]. Эти потери усугубляет направленная вовне радиальная диффузия, подталкивающая частицы в эту зону потерь через магнитопаузу [Schulz, Lanzerotti, 1974; Kessel, 2016].

Вслед за резким падением потоков электронов на главной фазе бури, начинается их усиление. По времени оно совпадает с восстановительной фазой магнитной бури. Потоки электронов умеренных энергий восстанавливаются несколько быстрее, в среднем примерно за 40 ч против двух суток в случае частиц с энергией больше 2 МэВ. Как отмечалось выше, основную роль в пополнении внешнего радиационного пояса играют два процесса: 1) дрейфово-резонансное

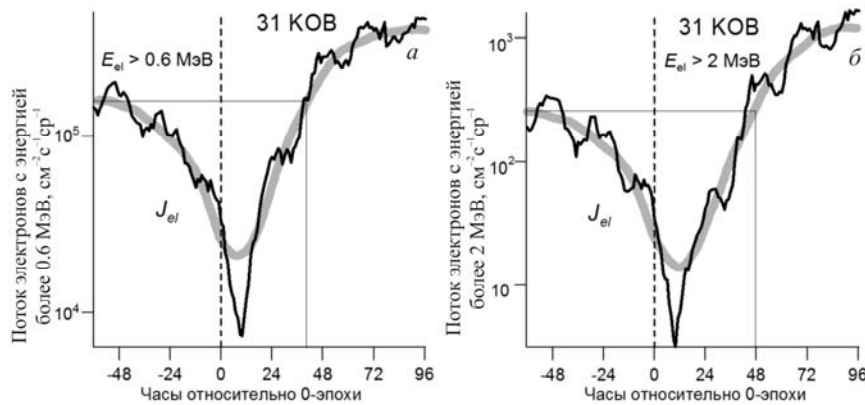


Рис. 2. Вариации потоков магнитосферных электронов с энергией более 600 кэВ (а) и более 2 МэВ (б) в период прохождения высокоскоростных потоков солнечного ветра типа KOB, полученные методом наложенных эпох по данным измерений на геостационарных спутниках GOES-8 и -12: черные кривые — среднечасовые значения, серые — скользящее среднее по 25 точкам [Potapov, 2013]

взаимодействие так называемых затравочных электронов — частиц с энергиями от десятков до сотен электрон-вольт — с колебаниями Pc5 [Elkington et al., 1999; Hudson et al., 2000; Губарь, 2010]; 2) циклотронный резонанс электронов с ОНЧ-излучениями — хорами, свистами и другими типами ОНЧ, а также с ионно-циклотронными волнами [Horne, Thorne, 1998; Summers, Ma, 2000; Summers et al., 2007]. Нельзя отрицать и вклад стохастических механизмов ускорения за счет воздействия на потоки электронов импульсов или иррегулярных возмущений поля, приводящих к нарушению третьего инварианта, смещению орбит захваченных частиц на меньшие высоты с одновременным ускорением [Green, Kivelson, 2004]. В любом случае все механизмы ускорения электронов до релятивистских скоростей требуют наличия в магнитосфере затравочных электронов, в качестве которых выступают обычно частицы, инжектируемые из геомагнитного хвоста во время суббурь.

2. ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

К настоящему времени в литературе предложены десятки методов прогноза потоков электронов во внешнем радиационном поясе [Baker et al., 1990; Ling et al., 2010; Weigel et al., 2003; Ukhorskiy et al., 2004; Li et al., 2001; Perry et al., 2010; Sakaguchi et al., 2015; Efitorov et al., 2016; Potapov et al., 2016]. Они отличаются: 1) выбором предикторов; 2) методами прогноза; 3) заблаговременностью. Число используемых предикторов варьирует от одного [http://www.swpc.noaa.gov/products/relativistic-electron-forecast-model] до 26 [Simms et al., 2014]. В качестве методов прогноза чаще всего предлагаются линейные фильтры [Baker et al., 1990], сформированные на основе многофакторного анализа [Simms et al., 2014, 2016; Potapov et al., 2016], в том числе с использованием фильтра Калмана [Sakaguchi et al., 2015], а также нелинейные методы, такие как нейронные

сети [Ling et al., 2010; Широкий и др., 2016] и нелинейное моделирование с помощью авторегрессии скользящего среднего (Nonlinear Autoregressive Moving Average Modeling — NARMAX) [Balikhin et al., 2011]. По заблаговременности прогнозы делятся на краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные.

2.1. Предикторы усиления потока релятивистских электронов

Выбор предикторов — важная предварительная процедура любого прогноза. Какие же предикторы используются обычно при построении методов прогноза потока релятивистских электронов?

Ясно, что процессы ускорения электронов начинают работать лишь в нестационарных условиях. Возмущенность магнитосферы может благоприятствовать повышению заселенности внешнего радиационного пояса двумя путями. Во-первых, во время магнитных бурь и суббурь происходит вброс и захват в геомагнитном поле затравочных электронов из хвоста. Это сопровождается высыпанием частиц в авроральных областях с одновременной генерацией нестационарных ионосферных токов и иррегулярных магнитных вариаций в широком диапазоне частот. Следовательно, индикаторами предстоящего усиления плотности энергичных электронов на геосинхронной орбите могут быть индексы авроральной активности, такие как *AE* [Baker et al., 1990; Li et al., 2009], а также показатели активности иррегулярных геомагнитных пульсаций типа *Pi1* [Degtyarev et al., 2009a, b, 2010]. Во-вторых, во время возмущений интенсивность разного рода импульсов, нестационарных колебаний магнитного поля значительно повышается, что может запускать стохастические механизмы ускорения электронов. Уровень этого рода возмущенности лучше отслеживается такими индексами, как планетарный индекс *K_p* и показатель интенсивности кольцевого тока *Dst*, поэтому эти индексы также могут использоваться в качестве предикторов [Nagai, 1988; Lyatsky, Khazanov, 2008].

Однако, как уже отмечалось, лишь половина магнитных бурь приводит к усилению потока энергичных электронов по сравнению с добуревым периодом, а кроме того, нет прямой корреляции между

интенсивностью бури и степенью усиления потока. Следовательно, должны иметься какие-то дополнительные факторы, способные выступать в роли предикторов.

С точки зрения физики наилучшими предикторами являются показатели тех процессов, которые участвуют в ускорении электронов до релятивистских энергий и могут объяснить вариации потоков частиц на геосинхронной орбите. Это в первую очередь амплитуды УНЧ-колебаний типа Pc4–5 (многолетний ряд индексов, характеризующих интенсивность этих колебаний на Земле, в солнечном ветре и на геостационарной орбите, приведен на сайте [ulf.gcras.ru]), амплитуды ОНЧ-излучений (свистов, хоров и т.д.), индексы магнитной возмущенности. Все они в рамках определенных моделей могут быть пересчитаны в эффективные коэффициенты диффузии электронов, т. е. могут характеризовать диффузионную накачку энергии частиц. С точки зрения статистики наилучшие предикторы — это параметры, имеющие наибольшие коэффициенты корреляции с потоками релятивистских электронов поодиночке или в совокупности с другими параметрами в рамках многомерного корреляционного анализа. В реальности не всегда два этих критерия оптимального выбора предикторов совпадают. Так, если руководствоваться коэффициентами парной корреляции, наиболее тесную связь с потоком электронов имеет скорость солнечного ветра V_{sw} [Paulikas, Blake, 1979; Lyons et al., 2005; Reeves et al., 2011, 2013; Kellerman, Shprits, 2012]. Однако нет ни одного разумного механизма, который бы объяснял прямое воздействие скорости обтекания магнитосферы плазмой солнечного ветра на интенсивность внешнего радиационного пояса. Опосредованное влияние, конечно, имеется. Оно в первую очередь связано с тем, что высокоскоростные потоки солнечного ветра приносят с собой МГД-волны ультранизкочастотного диапазона, или частично проникающие в магнитосферу, или модулирующие УНЧ-активность внутри магнитосферы [Потапов и др., 2012; Potapov, 2013]. Интенсивность УНЧ-колебаний и в солнечном ветре, и на Земле как раз является вторым по тесноте связи с плотностью релятивистских электронов параметром [Mann et al., 2004; Romanova et al., 2007; Romanova, Pilipenko, 2009; Потапов и др., 2012].

Итак, предикторы могут быть прямыми, описывающими непосредственное воздействие на прогнозируемый процесс, и прокси-параметрами (proxies), характеризующими некоторые свойства процесса и заменяющими прямые предикторы в тех случаях, когда информация о последних недоступна или недостаточна. В нашем случае прокси-предиктором может считаться скорость солнечного ветра, хотя она и имеет наибольший коэффициент корреляции с потоком электронов, а амплитуда УНЧ-колебаний и ОНЧ-излучений — это прямые предикторы. Часто в одном наборе прогностических параметров используют и те, и другие типы предикторов.

Другим важным свойством прогностических параметров является то, за какое время они могут предупредить об изменении прогнозируемого параметра (в нашем случае — потока релятивистских

электронов), т. е. заблаговременность прогноза Δt . Так, например, для амплитуды УНЧ-колебаний и на Земле, и в солнечном ветре заблаговременность равна 2–3 сут, для скорости солнечного ветра $\Delta t=2$ сут, а заблаговременность Δt изменения эклиптической компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) равна 0 сут, т. е. этот параметр меняется одновременно с потоком электронов в магнитосфере.

В таблице перечислены предикторы, наиболее часто используемые при разработке методов прогноза потока релятивистских электронов. Там же указан их тип (прямой или прокси) и ориентировочное значение заблаговременности (лаг) прогноза. Знаки вопроса означают либо отсутствие данных, либо разночтение между источниками.

2.2. О заблаговременности прогноза

Как отмечалось выше, прогнозы бывают краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные.

Краткосрочный прогноз нужен для оперативного реагирования. Получив заранее предупреждение, операторы спутниковых систем могут подготовиться к сбоям, перевести бортовую аппаратуру в щадящий режим, включить защитные средства. Часть предикторов имеет двух-трехсуточное опережение по отношению к усилению потоков релятивистских электронов, поэтому вполне возможен прогноз с заблаговременностью до трех суток. Он может оперативно корректироваться, если сначала составлять его только на основе предикторов с трехсуточным опережением, а затем уточнять, включая двухсуточные и суточные предикторы. Далее мы приведем пример построения краткосрочного прогноза.

Среднесрочный прогноз в нашем случае — это выдача предупреждения (alarm) о возможном подходе к магнитосфере высокоскоростного потока солнечного ветра. Заблаговременность такого прогноза может составлять до 5–6 сут, если имеются своевременные данные о направлении движения коронального выброса массы или траектории потока от корональной дыры. Этот прогноз может строиться только на основе наблюдений за выбросами корональной массы и корональными дырами. Его методика фактически совпадает с прогнозом геомагнитных возмущений на основе мониторинга Солнца. В момент взаимодействия фронта высокоскоростного потока солнечного ветра с магнитосферой включается процедура краткосрочного прогноза.

Долгосрочный прогноз — это скорее не прогноз, а рекомендации к планированию космических проектов. Основой таких рекомендаций могут служить данные о зависимости частоты и интенсивности потока релятивистских электронов от фазы цикла солнечной активности, совмещенные с прогнозом самого цикла. К настоящему времени накоплено достаточно материалов измерений потоков частиц, чтобы составить представление о их циклических вариациях. На рис. 3 приведен пример того, как менялся среднесуточный поток релятивистских электронов в течение 23-го солнечного цикла.

Полезной для долгосрочного прогноза может также оказаться информация о долговременных вариациях

Часто используемые предикторы для прогнозирования потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите

Параметры солнечного ветра (СВ)	Лаг, дни	Тип предиктора	Параметры магнитосферы	Лаг, дни	Тип предиктора
Скорость СВ V_{sw}	2	Proxy	Индекс AE авроральной электроструи	?	Proxy
Плотность плазмы СВ N_p	1	Proxy	Планетарный индекс K_p	?	Proxy
Южная компонента B_z ММП	1	Proxy (?)	Геомагнитный индекс Dst	?	Proxy
Проекция вектора ММП B_t на плоскость эклиптики	0	Proxy	Максимальный за сутки поток затравочных электронов J_{el}	1	Direct
Вариации СВ $\sigma V_{sw}/V_{sw}$	0	Proxy (?)	Амплитуда УНЧ-колебаний на Земле A_{gr}	2(3)	Direct
Вариации ММП $\sigma B/B$	1	Proxy	Амплитуда УНЧ-колебаний на геостационарной орбите A_{gs}	2	Direct
Динамическое давление СВ P_{dyn}	1	Direct (?)	Интенсивность ОНЧ-колебаний на Земле I_{gr}	?	Direct
Амплитуда УНЧ в СВ A_{sw}	2(3)	Proxy	Интенсивность ОНЧ-колебаний в магнитосфере I_{ms}	?	Direct
Межпланетное электрическое поле	1	Proxy	Горизонтальная компонента магнитного поля H_p на геосинхронной орбите		Direct
Вариации N_p	1	Proxy	Амплитуда пульсаций Pi1 A_{pi1}		Proxy

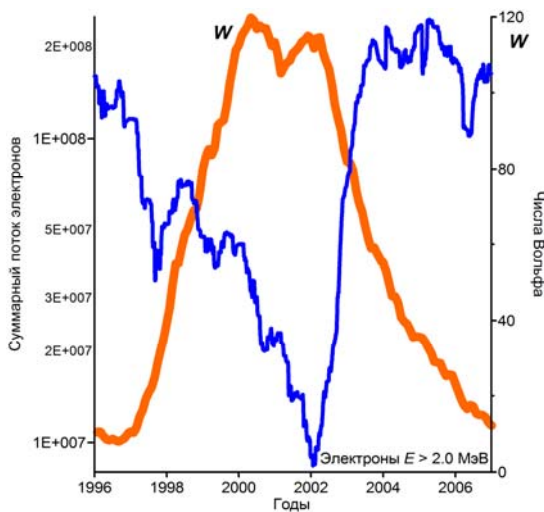


Рис. 3. Солнечно-циклическая вариация суточного интегрального потока электронов с энергией более 2 МэВ на геосинхронной орбите — черная кривая. Серая кривая — вариация числа солнечных пятен (числа Вольфа)

коэффициентов корреляции между потоком электронов и различными предикторами [Potapov et al., 2014; Myagkova, Dolenko, 2016]. На рис. 4 показано, как скорость солнечного ветра и кумулятивная амплитуда наземных УНЧ-колебаний в диапазоне Pc5 (150–600 с) коррелирует с потоками релятивистских электронов в ходе солнечного цикла. Видно, что, во-первых, уровень корреляции примерно одинаков для скорости солнечного ветра и амплитуды УНЧ и, во-вторых, связь минимальна в максимуме солнечной активности и максимальна в минимуме и на спаде цикла. Кумулятивная амплитуда вычисляется как

$$A_{int} = \sum_{j=i-3\mu}^i \log[A(i)] \exp\left(-\frac{i-j}{\mu}\right),$$

где μ — период времени, в течение которого накапливается информация об амплитуде, чтобы получить A_{int} [Romanova et al., 2007]. Авторы этого способа вычисления кумулятивной амплитуды показали ее более тесную связь с потоками энергичных электронов по сравнению с обычной амплитудой и объяснили это наличием кумулятивного эффекта некоторых диффузионных процессов: долго-

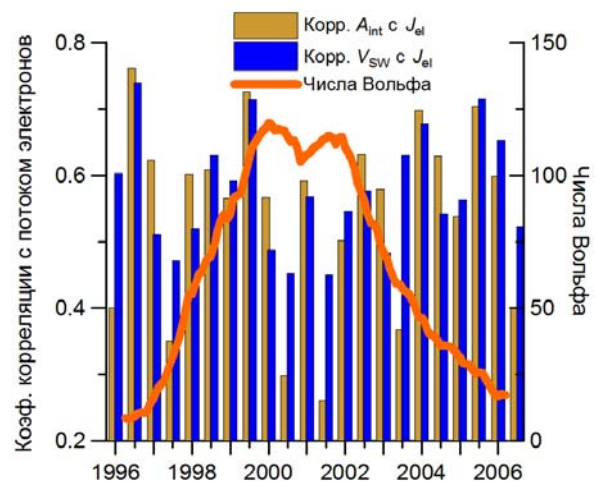


Рис. 4. Полугодовые значения коэффициента корреляции потока релятивистских электронов со скоростью солнечного ветра (черные столбики) и с кумулятивной наземной амплитудой УНЧ-колебаний в диапазоне Pc5 (серые столбики) в сравнении с вариацией солнечной активности (серая кривая) во время 23-го солнечного цикла [Potapov et al., 2014]

живущая волновая УНЧ-активность важнее для ускорения электронов, чем отдельные всплески волновой активности.

Следует заметить, что приведенные на рис. 3, 4 зависимости верны для стандартного течения солнечного цикла. В случае его нарушения, как это было во время аномального минимума 2008–2009 гг., наблюдались отклонения от показанных здесь закономерностей.

3. ПРИМЕР КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА

Приведем пример прогноза, основанного на многофакторном линейном регрессионном анализе восьми параметров, выступающих в роли предикторов. В отличие от других работ, основанных на многомерном статистическом анализе [Simms et al., 2014, 2015, 2016; Sakaguchi et al., 2015], в данном случае в процедуру прогноза введен дополнительный элемент, позволяющий уточнять коэффициенты

регрессии, получаемые в результате предварительно выполненного анализа регрессионных соотношений [Potapov et al., 2016]. В качестве предикторов взяты среднесуточные значения скорости солнечного ветра (V_{sw}), амплитуды УНЧ-колебаний диапазона Pc4–5 по наблюдениям на Земле (A_{gr}) и в солнечном ветре (A_{sw}), горизонтальной компоненты магнитного поля на геосинхронной орбите (H_p), плотности протонов солнечного ветра (N_p), динамического давления солнечного ветра (P_{dyn}), межпланетного электрического поля (E_y) и, наконец, максимальный за день поток J_{600} затравочных (seed) электронов с энергией порядка 600 кэВ, измеряемый на геосинхронной орбите. Первые четыре предиктора имеют лаг прогноза Δt , равный двум дням, для четырех последних — $\Delta t=1$ день. Все исходные данные для регрессионного анализа и для тестирования взяты за период с 1996 по 2006 г. Из них, после проверки на непрерывность временных рядов, было сформировано два набора данных. Первый включает в себя 184 суточных измерения за вторую половину 1999 г. Этот набор используется для получения исходных коэффициентов множественного регрессионного анализа. Второй набор данных включает в себя 184 измерения за вторую половину 2005 г. Он также не имеет пробелов в суточных данных. Этот набор был использован в качестве контрольного образца и для формирования дополнительного скользящего окна при проведении множественного регрессионного анализа.

Анализ обычной множественной регрессии состоит в следующем. На основе выборки, состоящей из ряда независимых и одного прогнозируемого параметра, рассчитываются коэффициенты множественного регрессионного анализа. Полученные коэффициенты используются для расчета значений прогнозируемого параметра с помощью набора предикторов из контрольной выборки. Контрольная выборка, таким образом, имитирует измерения в реальном времени.

Однако, если имело место изменение характера связей и, соответственно, коэффициентов регрессии между временными интервалами сбора данных основной и контрольной выборок, результаты прогнозирования будут неудовлетворительными. Чтобы избежать этого, в описываемой модели прогноза коэффициенты регрессии подстраиваются, для чего в модель множественного регрессионного анализа введена дополнительная выборка в виде скользящего окна длительностью 30 дней. Оно выделяется из контрольной выборки и расположено непосредственно перед днем прогноза, каждый раз продвигаясь вперед на один день. В процессе реального прогноза это скользящее окно будет следовать за фактическим днем прогноза. Значения предикторов дополнительной выборки добавляются к основной выборке, и на основе совместной выборки рассчитываются на каждый день новые коэффициенты регрессии. Рисунок 5 поясняет схему множественного регрессионного анализа с использованием скользящего окна [Потапов и др., 2016].

Модель выполняет два вида прогноза: двухдневный прогноз на основе четырех предикторов, имею-



Рис. 5. Блок-схема алгоритма множественной регрессии со скользящим окном [Потапов и др., 2016]

щих двухдневное опережение электронного потока, и однодневный прогноз на основе всех восьми предикторов.

Некоторые результаты работы описанной прогностической модели показаны на рис. 6. На верхней панели (рис. 6, а) приведены результаты оценки логарифма суммарного суточного потока релятивистских электронов $\lg J_{el}$ по модели с однодневным периодом прогноза на основе всех восьми предикторов. Сплошной черной линией показаны измерения значения потока, штриховой линией — значения, полученные с помощью коэффициентов регрессии, рассчитанных в рамках традиционного множественного регрессионного анализа, серой линией — оценки на основе коэффициентов, рассчитанных по методу скользящего окна. На рис. 6, б, в показано поведение квадрата отклонения прогноза $\lg J_{пр}$ от фактических значений потока $\lg J_{изм}$. Так же, как и на рис. 6, а, серые линии относятся к прогнозам по методу скользящего окна, а штриховые — по традиционному методу. На двух нижних панелях приведены также значения стандартной ошибки предсказания σ_{est}^1 (стандартный прогноз) и σ_{est}^2 (со скользящим окном).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение обсудим практические вопросы организации прогноза. Далеко не все предикторы доступны в режиме реального времени. Так, например, геомагнитный индекс AE появляется на общедоступных сайтах не ранее, чем спустя две недели после регистрации, а для индексов K_p и Dst оперативно доступны лишь их предварительные значения. Для некоторых других предикторов (амплитуда наземных УНЧ- или ОНЧ-колебаний, например) вообще нет отработанной процедуры сбора и распределения информации о них. Не удивительно поэтому, что единственный работающий в данное время прогноз основан всего на одном предикторе — скорости солнечного ветра [<http://www.swpc.noaa.gov/products/relativistic-electron-forecast-model>], вследствие чего точность его невелика и, как признают авторы метода, ошибки оценки особенно возрастают на фазе максимума солнечной активности, когда магнитосферу часто атакуют высокоскоростные потоки солнечного ветра.

Таким образом, организация оперативного прогноза, который позволил бы предупреждать о возможной угрозе для орбитальных объектов, находящихся на геосинхронной орбите, требует серьезной

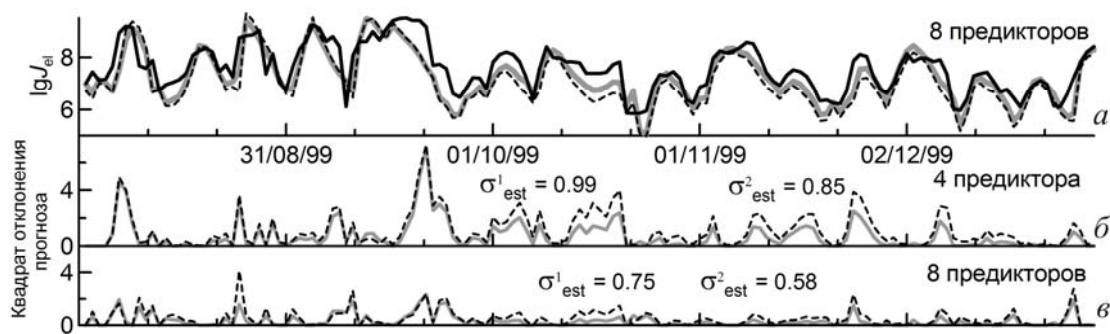


Рис. 6. Результаты оценки логарифма потока электронов по модели с однодневным периодом прогноза на основе восьми предикторов (а); вариации квадрата отклонения прогноза $lg J_{пр}$ от фактических значений потока $lg J_{изм}$ для варианта с двухдневным периодом прогноза на основе четырех предикторов (б); то же для варианта с однодневным периодом прогноза на основе восьми предикторов (в) [Потапов и др., 2016]

подготовки. В первую очередь необходимо выбрать оптимальную модель прогноза, использующую по возможности доступные в реальном времени предикторы с учетом заблаговременности прогноза по ним и их прогностического потенциала. Далее, надо организовать надежную систему сбора информации, позволяющую в реальном времени получать данные о параметрах, выбранных в качестве предикторов. При составлении алгоритма выработки прогностических оценок желательно предусмотреть регулярную корректировку характеристик алгоритма (коэффициентов регрессии, если используется метод множественной регрессии) путем применения скользящего окна или другим методом. Наконец, необходима постоянная текущая оценка точности и надежности прогноза, позволяющая оперативно его корректировать.

Что касается среднесрочных прогнозов, к ним требования другие. Важно, чтобы они хотя бы с 50%-й вероятностью предсказывали за двое-трое суток приход к Земле ударных волн на фронте высокоскоростных потоков. Это позволило бы обеспечить 3–5-дневный период подготовки к отражению всплеска релятивистских частиц. К сожалению, такая надежность среднесрочного прогноза пока недосяжима.

В этом обзоре мы описали основные характеристики электронной компоненты внешнего радиационного пояса Земли в области геосинхронной орбиты, перечислили физические процессы, приводящие к ускорению электронов, подчеркнули необходимость усилий по разработке методов прогноза высокоэнергичных электронов в указанной области, и дали описание основных возможных предикторов, а также привели пример прогностической модели для оценки потоков электронов с заблаговременностью 1–2 сут.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-05-00631 и 16-05-00056) и проекта № 0344-2015-0018 Программы 7 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гальпер А.М., Грачев В.М., Дмитриенко В.В. и др. Новая компонента внутреннего радиационного пояса Земли — электроны высоких энергий // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38, № 8. С. 409–411.

Губарь Ю.И. Дрейфовый резонанс релятивистских электронов с УНЧ-волнами как нелинейный резонанс // Космич. исслед. 2010. Т. 48, № 4. С. 308–316.

Кузнецов С.Н. Избранные труды по солнечно-земной физике / Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: Университетская книга, 2010. 256 с.

Пилипенко В.А., Романова Н.В. Воздействие космической погоды на работу космических аппаратов // Геофизич. исслед. 2005. № 2. С. 71–82.

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

Потапов А.С., Рыжакова Л.В., Цэгмед Б. Метод прогнозирования потока релятивистских электронов на геостационарной орбите // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 611–617.

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 // Космич. исслед. 2005. Т. 43, № 3. С. 186–193.

Романова Н.В., Чиженов В.А., Пилипенко В.А. Возможная связь аварий при запусках космических аппаратов с космодрома Плесецк с высокоширотными геомагнитными возмущениями // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49, № 1. С. 111–116.

Тверской Б.А. Захват быстрых частиц из межпланетного пространства // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 2099–2103.

Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968. 224 с.

Темный В.В. История открытия радиационных поясов Земли: кто же, когда и как? // Земля и Вселенная. 1993. № 5. С. 69–76.

Широкий В.Р., Доленко С.А., Мягкова И.Н., Сентемова Н.С. Исследование горизонта нейросетевого прогнозирования состояния магнитосферы Земли // XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016»: Сборник научных трудов. В 3 частях. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. Ч. 1. С. 172–182.

Baker D.N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to space weather // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. P. 2007–2016.

Baker D. Satellite anomalies due to space storms // Space storms and space weather hazards / Ed. Daglis I.A. New York: Springer, 2001. Chapter 10. P. 251–284.

Baker D.N., Higbie P.R., Belian R.D., Hones E.W. Do Jovian electrons influence the terrestrial outer radiation zone? // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. P. 531–534. DOI: 10.1029/GL006i006p00531.

Baker D.N., Belian R.D., Higbie P.R., et al. Deep dielectric charging effects due to high energy electrons in the

Earth's outer magnetosphere // *J. Electrostatics*. 1987. V. 20. P. 3–19.

Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Klebesadel R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 R_E // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95, N A9. P. 15133–15140. DOI: 10.1029/JA095iA09p15133.

Baker D.N., Allen J.H., Kanekal S.G., Reeves G.D. Disturbed space environment may have been related to Pager satellite failure // *EOS Trans. AGU*. 1998. P. 477.

Baker D.N., Kanekal S.G., Blake J.B., Pulkkinen T.I. The global efficiency of relativistic electron production in the Earth's magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 19169–19178.

Balikhin M.A., Boynton R.J., Walker S.N., et al. Using the NARMAX approach to model the evolution of energetic electron fluxes at geostationary orbit // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L18105. DOI: 10.1029/2011GL048980.

Borovsky J.E., Cayton T.E., Denton M.H., et al. The proton and electron radiation belts at geosynchronous orbit: Statistics and behavior during high-speed stream-driven storms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 5449–5488. DOI: 10.1002/2016JA022520.

Brautigam D.H., Albert J.M. Radial diffusion analysis of outer radiation belt electrons during the 9 October 1990 magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 291–309. DOI: 10.1029/1999JA900344.

Degtyarev V.I., Chudnenko S.E., Kharchenko I.P. Prediction of maximal daily average values of relativistic electron fluxes in geostationary orbit during the magnetic storm recovery phase // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009a. V. 49, N 8. P. 1208–1217. DOI: 10.1134/S0016793209080349.

Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., et al. Qualitative estimation of magnetic storm efficiency in producing relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt using geomagnetic pulsations data // *Adv. Space Res.* 2009b. V. 43. P. 829–836. DOI: 10.1016/j.asr.2008.07.004.

Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., et al. The relation between geomagnetic pulsations and an increase in the fluxes of geosynchronous relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50, N 7. P. 885–893. DOI: 10.1134/S0016793210070108.

Efitorov A., Myagkova I., Sentemova N., et al. Prediction of relativistic electrons flux in the outer radiation belt of the Earth using adaptive methods // *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists*. Springer International Publishing, 2016. P. 281–287. (*Adv. Intelligent Systems and Computing*. V. 449). URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-32554-5_36#page-1 (дата обращения 30 сентября 2016 г.).

Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 21. P. 3273–3276.

Fujimoto M., Nishida A. Energization and anisotropization of energetic electrons in the Earth's radiation belt by the recirculation process // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95, A4. P. 4265–4270. DOI: 10.1029/JA095iA04p04265.

Freeman J.W., O'Brien T.P., Chan A.A., Wolf R.A. Energetic electrons at geostationary orbit during the November 3–4, 1993 storm: Spatial/temporal morphology, characterization by a power law spectrum and, representation by an artificial neural network // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 26251–26260. DOI: 10.1029/97JA03268.

Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere — A review // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 265–282.

Green J.C., Kivelson M.G. Relativistic electrons in the outer radiation belt: Differentiating between acceleration mechanisms // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A03213. DOI: 10.1029/2003JA010153.

Horne R.B., Thorne R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic

storms // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3011–3014. DOI: 10.1029/98GL01002.

Hudson M.K., Elkington S.R., Lyon J.G., Goodrich C.C. Increase in relativistic electron flux in the inner magnetosphere: ULF wave mode structure // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25, N 12. P. 2327–2337. DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00518-9.

Kellerman A.C., Shprits Y.Y. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A05217. DOI: 10.1029/2011JA017253.

Kessel M. Things we do not yet understand about solar driving of the radiation belts // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 5549–5552. DOI: 10.1002/2016JA022472.

Li X., Temerin M., Baker D.N., et al. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 1887–1890. DOI: 10.1029/2000GL012681.

Li L., Cao J., Zhou G. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A03203. DOI: 10.1029/2004JA010628.

Li L.Y., Cao J.B., Zhou G.C., Li X. Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A12214. DOI: 10.1029/2009JA014333.

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. V. 8. S09003. DOI: 10.1029/2010SW000576.

Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A08224. DOI: 10.1029/2008JA013048.

Lyons L.R., Lee D.-Y., Thorne R.M., et al. Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streams // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A11202. DOI: 10.1029/2005JA011254.

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 // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2004. V. 66. P. 187–198.

Mathie R.A., Mann I.R. On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at midlatitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 29783–29796.

Miyoshi Y., Kataoka R. Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L21105. DOI: 10.1029/2005GL024590.

Miyoshi Y., Kataoka R. Flux enhancement of the outer radiation belt electrons after the arrival of stream interaction regions // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A03S09. DOI: 10.1029/2007JA012506.

Myagkova I.N., Dolenko S.A. Comparative analysis of the quality of prediction for fluences of relativistic electrons of the outer radiation belt of the Earth at different phases of the solar activity cycle // 11th International Conference “Problems of Geocosmos”: Book of Abstracts. St. Petersburg, Petrodvorets, October 3–7, 2016. St. Petersburg State University, 2016. P. 79.

Nagai T. Space weather forecast: Prediction of relativistic electron intensity at synchronous orbit // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 425–428.

O'Brien T.P., Lorentzen K.R., Mann I.R., et al. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual ULF and VLF acceleration // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A8. P. 2156–2202. DOI: 10.1029/2002JA009784.

Ozeke L.G., Mann I.R., Murphy K.R., et al. Analytic expressions for ULF wave radiation belt radial diffusion coefficients // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 1587–1605. DOI: 10.1002/2013JA019204.

Parker E.N. Geomagnetic fluctuations and the form of the outer zone of the Van Allen radiation belt // *J. Geophys. Res.* 1960. V. 65, N 10. P. 3117–3130. DOI: 10.1029/JZ065i010p03117.

Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit // *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*. 1979. P. 180–202. (Geophys. Monogr. Amer. Geophys. Un. V. 21).

Perry K.L., Ginot G.P., Ling A.G., Hilmer R.V. Comparing geosynchronous relativistic electron prediction models // *Space Weather*. 2010. V. 8. S12002. DOI: 10.1029/2010SW000581.

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. V. 37, N 6. P. 1192–1205.

Potapov A.S. ULF wave activity in high-speed streams of the solar wind: Impact on the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 10. P. 6465–6477. DOI: 10.1002/2013JA019119.

Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. Solar cycle variation of “killer” electrons at geosynchronous orbit and electron flux correlation with the solar wind parameters and ULF waves intensity // *Acta Astronautica*. 2014. V. 93. P. 55–63. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.004.

Potapov A.S., Ryzhakova L.V., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit // *Acta Astronautica*. 2016. V. 126. P. 47–51. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.017.

Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O’Brien T.R. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 10. 1529. DOI: 10.1029/2002GL016513.

Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W., et al. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A02213. DOI: 10.1029/2010JA015735.

Reeves G., Morley S., Cunningham G. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 3. P. 1040–1048. DOI: 10.1002/jgra.50126.

Roeder J. L., Fennell J. F., O’Brien T. P. Acceleration and losses of relativistic electrons due to whistler-mode chorus: SCATHA observations // *AGU Fall Meeting, 2005. Abstract #SM41D-07*.

Romanova N., Pilipenko V. ULF wave indices to characterize the solar wind – magnetosphere interaction and relativistic electron dynamics // *Acta Geophys.* 2009. V. 57. P. 158–170. DOI: 10.2478/s11600-008-0064-4.

Romanova N., Pilipenko V., Crosby N., Khabarova O. ULF wave index and its possible applications in space physics // *Bulg. J. Phys.* 2007. V. 34. P. 136–148.

Sakaguchi K., Nagatsuma T., Reeves G.D., Spence H.E. Prediction of MeV electron fluxes throughout the outer radiation belt using multivariate autoregressive models // *Space Weather*. 2015. V. 13. P. 853–867. DOI: 10.1002/2015SW001254.

Schulz M., Lanzerotti L. Particle Diffusion In The Radiation Belts. Berlin: Springer, 1974. 218 p.

Sheldon R.B., Spence H.E., Sullivan J.D., et al. The discovery of trapped energetic electrons in the outer cusp // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 11. P. 1825–1828.

Shprits Y., Drozdov A.Y., Spasojevic M., et al. Wave-induced loss of ultra-relativistic electrons in the Van Allen radiation belts // *Nature Communications*. 2016. V. 7. 12883. DOI: 10.1038/ncomms12883.

Simms L.E., Pilipenko V., Engebretson M.J., et al. Prediction of relativistic electron flux at geostationary orbit following storms: Multiple regression analysis // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119, N 9. P. 7297–7318. DOI: 10.1002/2014JA019955.

Simms L.E., Engebretson M.J., Smith A.J., et al. Analysis of the effectiveness of ground-based VLF wave observations for predicting or nowcasting relativistic electron flux at geostationary orbit // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120. P. 2052–2060. DOI: 10.1002/2014JA020337.

Simms L.E., Engebretson M.J., Pilipenko V., et al. Empirical predictive models of daily relativistic electron flux at geostationary orbit: Multiple regression analysis // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 3181–3197. DOI: 10.1002/2016JA022414.

Summers D., Ma C. A model for generating relativistic electrons in the Earth's inner magnetosphere based on gyroresonant wave-particle interactions // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A2. P. 2625–2640. DOI: 10.1029/1999JA900444.

Summers D., Ni B., Meredith N.P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A04207. DOI: 10.1029/2006JA011993.

Turner D.L., Morley S.K., Miyoshi Y., et al. Outer radiation belt flux dropouts: Current understanding and unresolved questions // *Dynamics of Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere* / Ed. by D. Summers et al. 2012. P. 195–212. (Geophys. Monogr. Ser. V. 199). DOI: 10.1029/2012GM001310.

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Sharma A.S., et al. Data-derived forecasting model for relativistic electron intensity at geosynchronous orbit // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L09806. DOI: 10.1029/2004GL019616.

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Millan R.M. Enhanced radial transport and energization of radiation belt electrons due to drift orbit bifurcations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 163–170. DOI: 10.1002/2013JA019315.

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Millan R.M., et al. Global storm time depletion of the outer electron belt // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120. P. 2543–2556. DOI: 10.1002/2014JA020645.

Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Precursor analysis and prediction of large-amplitude relativistic electron fluxes // *Space Weather*. 2003. V. 1. P. 1014. DOI: 10.1029/2003SW000023.

Xiao F., Shen C., Wang Y., et al. Energetic electron distributions fitted with a relativistic kappa-type function at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A05203. DOI: 10.1029/2007JA012903.

URL: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRReeeIY4NuZm-hTm8qUT6aNUkZ53jtpcCd8eo6d-pL88X2DVNZw/> (дата обращения 30 сентября 2016 г.).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/relativistic-electron-forecast-model/> (дата обращения 30 сентября 2016 г.).

URL: <http://ulf.gcras.ru/> (дата обращения 30 сентября, 2016).

REFERENCES

Baker D.N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to space weather. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000, vol. 28, pp. 2007–2016.

Baker D. Satellite anomalies due to space storms. *Space Storms and Space Weather Hazards* / Ed. Daglis I.A. New York, Springer Publ., 2001, chap. 10, pp. 251–284.

Baker D.N., Higbie P.R., Belian R.D., Hones E.W. Do Jovian electrons influence the terrestrial outer radiation zone? *Geophys. Res. Lett.* 1979, vol. 6, pp. 531–534. DOI: 10.1029/GL006i006p00531.

Baker D.N., Belian R.D., Higbie P.R., Klebesadel R.W., Blake J.B. Deep dielectric charging effects due to high energy electrons in the Earth's outer magnetosphere. *J. Electrostatics*. 1987, vol. 20, pp. 3–19.

Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Klebesadel R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 R_E. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, no. A9, pp. 15133–15140. DOI: 10.1029/JA095iA09p15133.

- Baker D.N., Allen J.H., Kanekal S.G., Reeves G.D. Disturbed space environment may have been related to Pager satellite failure. *EOS Trans. AGU*. 1998, p. 477.
- Baker D.N., Kanekal S.G., Blake J.B., Pulkkinen T.I. The global efficiency of relativistic electron production in the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 19169–19178.
- Balikhin M.A., Boynton R.J., Walker S.N., Borovsky J.E., Billings S.A., Wei H.L. Using the NARMAX approach to model the evolution of energetic electrons fluxes at geostationary orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2011, vol. 38, L18105. DOI: 10.1029/2011GL048980.
- Borovsky J.E., Cayton T.E., Denton M.H., Belian R.D., Christensen R.A., Ingraham J.C. The proton and electron radiation belts at geosynchronous orbit: Statistics and behavior during high-speed stream-driven storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 5449–5488. DOI: 10.1002/2016JA022520.
- Brautigam D.H., Albert J.M. Radial diffusion analysis of outer radiation belt electrons during the 9 October 1990 magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 291–309. DOI: 10.1029/1999JA900344.
- Degtyarev V.I., Chudnenko S.E., Kharchenko I.P., Tsegmed B., Xue B. Prediction of maximal daily average values of relativistic electron fluxes in geostationary orbit during the magnetic storm recovery phase. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009a, vol. 49, no. 8, pp. 1208–1217. DOI: 10.1134/S0016793209080349.
- Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., Tsegmed B., Chudnenko S.E. Qualitative estimation of magnetic storm efficiency in producing relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt using geomagnetic pulsations data. *Adv. Space Res.* 2009b, vol. 43, pp. 829–836. DOI: 10.1016/j.asr.2008.07.004.
- Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., Tsegmed B., Chudnenko S. E. The relation between geomagnetic pulsations and an increase in the fluxes of geosynchronous relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010, vol. 50, no. 7, pp. 885–893. DOI: 10.1134/S0016793210070108.
- Efitorov A., Myagkova I., Sentemova N., et al. Prediction of relativistic electrons flux in the outer radiation belt of the Earth using adaptive methods. *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists*. Springer International Publ., 2016. P. 281–287. (Adv. Intelligent Systems and Computing, vol. 449). URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-32554-5_36#page-1 (accessed September 30, 2016).
- Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations. *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, no. 21, pp. 3273–3276.
- Fujimoto M., Nishida A. Energization and anisotropization of energetic electrons in the Earth's radiation belt by the recirculation process. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, no. A4, pp. 4265–4270. DOI: 10.1029/JA095iA04p04265.
- Freeman J.W., O'Brien T.P., Chan A.A., Wolf R.A. Energetic electrons at geostationary orbit during the November 3–4, 1993 storm: Spatial/temporal morphology, characterization by a power law spectrum and, representation by an artificial neural network. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 26251–26260. DOI: 10.1029/97JA03268.
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 265–282.
- Gal'per A.M., Grachev V.M., Dmitrenko V.V., Kirillov-Ugryumov V.G., Ulin S.E. New component of the Earth's inner radiation belt: High-energy electrons. *JETP Lett.* 1983, vol. 38, no. 8, pp. 497–500.
- Green J.C., Kivelson M.G. Relativistic electrons in the outer radiation belt: Differentiating between acceleration mechanisms. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A03213. DOI: 10.1029/2003JA010153.
- Gubar' Yu.I. Drift resonance of relativistic electrons with ULF waves as a nonlinear resonance. *Cosmic Res.* 2010, vol. 48, no. 4, pp. 300–307. DOI: 10.1134/S0010952510040039.
- Horne R.B., Thorne R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, pp. 3011–3014. DOI: 10.1029/98GL01002.
- Hudson M.K., Elkington S.R., Lyon J.G., Goodrich C.C. Increase in relativistic electron flux in the inner magnetosphere: ULF wave mode structure. *Adv. Space Res.* 2000, vol. 25, no. 12, pp. 2327–2337. DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00518-9.
- Kellerman A.C., Shprits Y.Y. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A05217. DOI: 10.1029/2011JA017253.
- Kessel M. Things we do not yet understand about solar driving of the radiation belts. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 5549–5552. DOI: 10.1002/2016JA022472.
- Kuznetsov S.N. *Izbrannye trudy po solnechno-zemnoi fizike* [Selected Works on Solar-Terrestrial Phys.]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2010, 256 p. (In Russian).
- 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. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, pp. 1887–1890. DOI: 10.1029/2000GL012681.
- Li L., Cao J., Zhou G. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03203. DOI: 10.1029/2004JA010628.
- Li L.Y., Cao J.B., Zhou G.C., Li X. Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A12214. DOI: 10.1029/2009JA014333.
- 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, S09003. DOI: 10.1029/2010SW000576.
- Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A08224. DOI: 10.1029/2008JA013048.
- Lyons L.R., Lee D.-Y., Thorne R.M., Horne R.B., Smith A.J. Solar wind-magnetosphere coupling leading to relativistic electron energization during high-speed streams. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A11202. DOI: 10.1029/2005JA011254.
- 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. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004, vol. 66, pp. 187–198.
- Mathie R.A., Mann I.R. On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at midlatitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 29783–29796.
- Miyoshi Y., Kataoka R. Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L21105. DOI: 10.1029/2005GL024590.
- Miyoshi Y., Kataoka R. Flux enhancement of the outer radiation belt electrons after the arrival of stream interaction regions. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A03S09. DOI: 10.1029/2007JA012506.
- Myagkova I.N., Dolenko S.A. Comparative analysis of the quality of prediction for fluences of relativistic electrons of the outer radiation belt of the Earth at different phases of the solar activity cycle. *11th International Conference and School "Problems of Geocosmos": Book of Abstracts*. St.-Petersburg, October 3–7, 2016. St.-Petersburg, 2016, p. 79.
- Nagai T. Space weather forecast: Prediction of relativistic electron intensity at synchronous orbit. *Geophys. Res. Lett.* 1988, vol. 15, pp. 425–428.

- O'Brien T.P., Lorentzen K.R., Mann I.R., Meredith N.P., Blake J.B., Fennell J.F., Looper M.D., Milling D.K., Anderson R.R. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual ULF and VLF acceleration. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A8, pp. 2156–2202. DOI: 10.1029/2002JA009784.
- Ozeke L.G., Mann I.R., Murphy K.R., Rae I.J., Milling D.K. Analytic expressions for ULF wave radiation belt radial diffusion coefficients. *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2014, vol. 119, pp. 1587–1605. DOI: 10.1002/2013JA019204.
- Parker E.N. Geomagnetic fluctuations and the form of the outer zone of the Van Allen radiation belt. *J. Geophys. Res.* 1960, vol. 65, no. 10, pp. 3117–3130. DOI: 10.1029/JZ065i010p03117.
- Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit. *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*. 1979, pp. 180–202. (Geophys. Monogr. Amer. Geophys. Un., vol. 21).
- Perry K.L., Ginet G.P., Ling A.G., Hilmer R.V. Comparing geosynchronous relativistic electron prediction models. *Space Weather*. 2010, vol. 8, S12002. DOI: 10.1029/2010SW000581.
- Pilipenko V.A., Romanova N.V. The impact of space weather on the operation of spacecraft. *Geofizicheskie issledovaniya* [Geophys. Res.]. 2005, no. 2, pp. 71–82. (In Russian).
- 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, no. 6, pp. 1192–1205.
- Potapov A.S. ULF wave activity in high-speed streams of the solar wind: Impact on the magnetosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, no. 10, pp. 6465–6477. DOI: 10.1002/2013JA019119.
- 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. *Cosmic Res.* 2012, vol. 50, no. 2, pp. 124–140. DOI: 10.1134/S0010952512020086.
- Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. Solar cycle variation of “killer” electrons at geosynchronous orbit and electron flux correlation with the solar wind parameters and ULF waves intensity. *Acta Astronautica*. 2014, vol. 93, pp. 55–63. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.004.
- Potapov A.S., Ryzhakova L.V., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit. *Acta Astronautica*. 2016, vol. 126, pp. 47–51. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.017.
- Potapov A.S., Ryzhakova L.V., Tsegmed B. A method to forecast the relativistic electron flux at geostationary orbit. *Vestnik SibGAU* [Bull. of Siberian State Aerospace University]. 2016, vol. 17, no. 3, pp. 611–617. (In Russian).
- Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.R. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, no. 10, 1529. DOI: 10.1029/2002GL016513.
- Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W., Henderson M.G., Cayton T.E., Cunningham G., Blake J.B., Christensen R.A., Thomsen D. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A02213. DOI: 10.1029/2010JA015735.
- Reeves G., Morley S., Cunningham G. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons. *J. Geophys. Res.: Space Physics* 2013, vol. 118, no. 3, pp. 1040–1048. DOI: 10.1002/jgra.50126.
- Roeder J.L., Fennell J.F., O'Brien T.P. Acceleration and losses of relativistic electrons due to whistler-mode chorus: SCATHA observations. *AGU Fall Meeting*. 2005, Abstract #SM41D-07.
- Romanova N., Pilipenko V. ULF wave indices to characterize the solar wind — magnetosphere interaction and relativistic electron dynamics. *Acta Geophys.* 2009, vol. 57, pp. 158–170. DOI: 10.2478/s11600-008-0064-4.
- 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. *Cosmic Res.* 2005, vol. 43, no. 3, pp. 179–185. DOI: 10.1007/s10604-005-0032-6.
- Romanova N., Pilipenko V., Crosby N., Khabarova O. ULF wave index and its possible applications in space physics. *Bulg. J. Phys.* 2007, vol. 34, pp. 136–148.
- Romanova N.V., Chizhenkov V.A., Pilipenko V.A. Possible relation of emergencies during spacecraft launches from the Plesetsk site to high-latitude geomagnetic disturbances. *Geomagn. Aeron.* 2009, vol. 49, no. 1, pp. 104–109. DOI: 10.1134/S0016793209010149.
- Sakaguchi K., Nagatsuma T., Reeves G.D., Spence H.E. Prediction of MeV electron fluxes throughout the outer radiation belt using multivariate autoregressive models. *Space Weather*. 2015, vol. 13, pp. 853–867. DOI: 10.1002/2015SW001254.
- Schulz M., Lanzerotti L. *Particle Diffusion In The Radiation Belts*. Berlin, Springer Publ., 1974, 218 p.
- Sheldon R.B., Spence H.E., Sullivan J.D., Fritz T.A., Chen J. The discovery of trapped energetic electrons in the outer cusp. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, no. 11, pp. 1825–1828.
- Shiroky V.R., Dolenko S.A., Myagkova I.N., Sentemova N.S. A study of neural network forecasting horizon of the Earth's magnetosphere state, *XVIIIth International Scientific and Technical Conference “Neuroinformatika-2016”*, Collection of scientific papers. In 3 parts. Moscow, NIYU MIPhI Publ., 2016, Pt. 1, pp. 172–182. (In Russian).
- Shprits Y., Drozdov A.Y., Spasojevic M., Kellerman A.C., Usanova M.E., Engebretson M.J., Agapitov O.V., Orlova K.G., Zhelavskaya I.S., Raita T., Spence H.E., Baker D.N., Zhu H. Wave-induced loss of ultra-relativistic electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature Communications*. 2016, vol. 7, 12883. DOI: 10.1038/ncomms12883.
- Simms L.E., Pilipenko V., Engebretson M.J., Reeves G.D., Smith A.J., Clilverd M. Prediction of relativistic electron flux at geostationary orbit following storms: Multiple regression analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 9, pp. 7297–7318. DOI: 10.1002/2014JA019955.
- Simms L.E., Engebretson M.J., Smith A.J., Clilverd M., Pilipenko V., Reeves G.D. Analysis of the effectiveness of ground-based VLF wave observations for predicting or nowcasting relativistic electron flux at geostationary orbit. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 2052–2060. DOI: 10.1002/2014JA020337.
- Simms L.E., Engebretson M.J., Pilipenko V., Reeves G.D., Clilverd M. Empirical predictive models of daily relativistic electron flux at geostationary orbit: Multiple regression analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 3181–3197. DOI: 10.1002/2016JA022414.
- Summers D., Ma C. A model for generating relativistic electrons in the Earth's inner magnetosphere based on gyroresonant wave-particle interactions. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A2, pp. 2625–2640. DOI: 10.1029/1999JA900444.
- Summers D., Ni B., Meredith N.P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A04207. DOI: 10.1029/2006JA011993.
- Temny V.V. History of the discovery of the Earth's radiation belts: Who, when and how? *Zemlya i Vseleennaya* [Earth and Universe]. 1993, no. 5, pp. 69–76. (In Russian).
- Turner D.L., Morley S.K., Miyoshi Y., et al. Outer radiation belt flux dropouts: Current understanding and unresolved questions. *Dynamics of Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere*. Ed. by D. Summers et al. 2012, pp. 195–212. (Geophys. Monogr. Ser., vol. 199). DOI: 10.1029/2012GM001310.
- Tverskoy B.A. Capture of fast particles from interplanetary space. *Izv. AN SSSR. Ser. fiz.* [Bull. Russian Academy of Sciences. Physics]. 1964, vol. 28, pp. 2099–2103. (In Russian).

Tverskoy B.A. *Dinamika radiatsionnykh poyasov Zemli* [Dynamics of the Earth's radiation belts]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 224 p. (In Russian).

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Sharma A.S., Anderson B.J., Ohtani S., Lui A.T.Y. Data-derived forecasting model for relativistic electron intensity at geosynchronous orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2004, vol. 31, L09806. DOI: 10.1029/2004GL019616.

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Millan R.M., Kress B.T., Smith D.C. Enhanced radial transport and energization of radiation belt electrons due to drift orbit bifurcations. *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2014. vol. 119, pp. 163–170. DOI: 10.1002/2013JA019315.

Ukhorskiy A. Y., Sitnov M.I., Millan R.M., Kress B.T., Fennell J.F., Claudepierre S.G., Barnes R.J. Global storm time depletion of the outer electron belt. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 2543–2556. DOI: 10.1002/2014JA020645.

Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Precursor analysis and prediction of large-amplitude relativistic electron fluxes. *Space Weather*. 2003, vol. 1, p. 1014. DOI: 10.1029/2003SW000023.

Xiao F., Shen C., Wang Y., Zheng H., Wang S. Energetic electron distributions fitted with a relativistic kappa-type function at geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A05203. DOI: 10.1029/2007JA012903.

URL: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRReeIY4NuZm-hTm8qUT6aNuKZ53jtpeCd8eo6d-pL88X2DVNZw/> (accessed September 30, 2016).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/relativistic-electron-forecast-model/> (accessed September 30, 2016).

URL: <http://ulf.gcras.ru/> (accessed September 30, 2016).