

## ДИНАМИКА КР-ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ СЕМИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ (В ПЕРИОД 1932 – 2014 ГОДОВ). СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович,  
М. В. Кожухов, Ю. С. Павлов

*Показана связь динамики Кр-индекса геомагнитной активности с годовыми распределениями высокоскоростных потоков солнечного ветра и корональных выбросов. Показано, что вблизи максимумов солнечной активности среднегодовое число корональных выбросов ~ в 8 раз (среднее значение за 20 – 23 циклы) превышает число высокоскоростных потоков, среднегодовые величины Кр-индекса формируются корональными выбросами. Показано, что на фазе спада солнечной активности, среднегодовое число высокоскоростных потоков ~ в 6 раз (среднее значение за 20 – 23 циклы) превышает число корональных выбросов, среднегодовые величины Кр-индекса формируются высокоскоростными потоками плазмы солнечного ветра. Для выделения сезонных вариаций в работе проведён анализ внутригодовых суточных распределений Кр-индекса. Годовое распределение числа случаев (лет) по типу сезонных вариаций (сильные вариации, незначительные и нерегулярные изменения) очень неравномерно и изменяется от цикла к циклу, слабо зависит от фазы солнечного цикла и не зависит от направления магнитного поля Солнца. За время семи солнечных циклов (83 г.) сильные сезонные вариации наблюдаются в 34 случаях (41% от общего количества), вариации отсутствуют для 15 случаев (18%). Получены средние величины вариаций Кр-индекса для каждой фазы солнечного цикла. Показана связь сезонных вариаций потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и продолжительности высыпаний энергичных электронов в ионосферу с сезонными вариациями Кр-индекса.*

**Ключевые слова:** сезонные изменения геомагнитной активности, потоки релятивистских электронов, ионосфера, магнитосфера Земли.

### Введение

Амплитуда вариаций магнитного поля Земли используется как наиболее общая характеристика интенсивности целого ряда процессов, возникающих в магнитосфере Земли при воздействии потоков солнечного ветра (СВ). Кр-индекс геомагнитной активности, как численная мера вариаций магнитного поля используется при рассмотрении связи магнитосферных процессов с геомагнитной активностью. Планетарный Кр-индекс характеризует глобальную возмущённость магнитного поля Земли (магнитные бури и суббури) в трёхчасовом интервале времени. Индекс Кр определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых на 13 среднеширотных магнитных обсерваториях. На основе динамики 3-часовых значений Кр-индекса (значения известны с 1932 г.) была разработана классификация магнитных бурь: слабые бури, уровень возмущённости G1,  $Kp = 5$ , в среднем наблюдается 1 буря за 2 – 3 часа; умеренные бури, уровень G2,  $Kp = 6$ , в среднем 1 буря в неделю; сильные бури, уровень G3,  $Kp = 7$ , 1 буря в 2 – 3 недели; уровень G4,  $Kp = 8$ , очень сильные бури, 1 буря в 1,5 – 2 месяца; уровень G5,  $Kp > 8$ , экстремальные бури, 4 – 6 раз за 11-летний цикл солнечной активности. Кр-индекс используется как некоторая пороговая величина для предупреждения о рисках при увеличении геомагнитной активности. Динамика геомагнитной активности формируется при воздействии крупномасштабных структур

солнечного ветра (ударные волны, корональные выбросы, высокоскоростные потоки, иногда рекуррентные) [1, 2]. Геоэффективность таких структур часто оценивается по величине Кр-индекса [2]. При анализе геомагнитной активности за 1964 – 2003 гг. были получены следующие данные. Для 727 высокоскоростных потоков величина  $Kp < 4+$  зафиксирована для 29% событий,  $4 \leq Kp \leq 5+$  – для 35,6% событий,  $5 < Kp < 70$  – для 29,7% событий,  $Kp > 70$  – для 5,6% событий. Для 170 корональных выбросов  $Kp < 4+$  зафиксировано для 14,7% событий,  $4 \leq Kp \leq 5+$  – для 19,4%,  $5 < Kp < 70$  – для 29,4% событий,  $Kp > 70$  – для 36,5% событий. Это означает, что для магнитных бурь типа G3 и G4 эффективность корональных выбросов почти в 7 раз выше по сравнению с эффективностью высокоскоростных потоков. Во многих случаях Кр-индекс успешно используется в качестве основного параметра (параметра параметризации) для описания целого ряда магнитосферных процессов, появилась возможность предсказать динамику этих процессов и понять физические механизмы их возникновения. Кр-индекс может использоваться как прямой монитор силы магнитосферной конвекции [3]. Кр-индекс применяется при расчёте вариаций плотности атмосферы [4], что очень важно для оценки торможения спутников, при вычислении положения магнитопаузы [5] и для моделей аврального высыпания электронов внешнего радиационного пояса Земли [6]. По измерениям на спутниках (AMPTE, GOES) была установлена

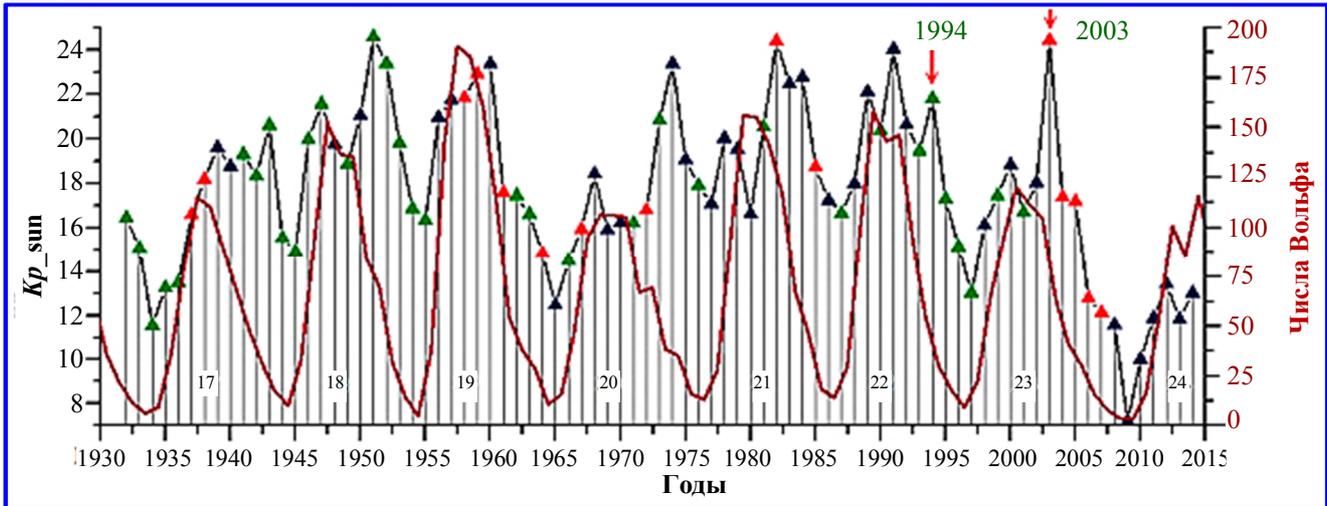


Рис. 1. Среднесуточные значения  $Kp$ -индексов за период с 1932 по 2014 гг. Зелёными треугольниками отмечены года, когда наблюдались значительные сезонные вариации  $Kp$ -индекса геомагнитной активности. Синим цветом – года, когда сезонные вариации были почти не заметны. Красным цветом – года, когда сезонные вариации не наблюдались. Коричневым цветом показаны циклы солнечной активности с 17-го по 24-й

корреляция спектральной плотности мощности низкочастотных волн с величиной  $Kp$ -индекса [7]. В диффузионных моделях для описания динамики заряженных частиц радиационных поясов Земли используются величины коэффициентов диффузии частиц, вычисленные по данным  $Kp$ -индексов [8]. Влияние  $Kp$ -индекса на космическую погоду проявляется в корреляции числа неисправностей, зарегистрированных на космических аппаратах, с динамикой  $Kp$ -индекса [9]. В работе проводится анализ годовых и сезонных вариаций  $Kp$ -индекса для семи циклов солнечной активности.

#### Зависимость величин $Kp$ -индекса от фазы цикла солнечной активности

Основными источниками, определяющими динамику геомагнитной активности, являются высокоскоростные потоки солнечного ветра и корональные выбросы. Среднегодовая геомагнитная активность отражает суммарный эффект влияния отдельных структур солнечного ветра. Зависимость числа высокоскоростных потоков и корональных выбросов от фазы солнечного цикла (числа солнечных пятен и числа групп солнечных пятен – чисел Вольфа) фактически формирует среднегодовую динамику геомагнитной активности и соответственно динамику среднегодовых величин  $Kp$ -индекса. На рис. 1 представлены среднегодовые суточные значения  $Kp$ -индекса и чисел Вольфа за период с 1932 по 2014 гг. (17 – 23 циклы). Циклы солнечной активности и геомагнитной активности по времени не совпадают. Минимум геомагнитной активности наблюдается в начале очередного цикла на фазе

подъёма. Исключением является 24-й цикл активности Солнца, минимум геомагнитной активности приходится непосредственно на начало 24-го цикла. Максимум геомагнитной активности запаздывает относительно максимума солнечной активности на несколько лет. Средние для семи циклов (17 – 23 циклы) среднесуточные значения  $Kp$ -индекса на фазе подъёма, в максимуме активности и на фазе спада составляют  $Kp = 17,5$ ,  $Kp = 19,3$  и  $Kp = 20$ . Годовые вариации среднесуточных величин  $Kp$ -индекса отражают годовые вариации высокоскоростных потоков СВ и корональных выбросов. Среднегодовые абсолютные величины  $Kp$ -индекса формируются как суммарный эффект воздействия различных структур солнечного ветра. Сравним динамику среднегодовых величин  $Kp$ -индекса со структурой потоков СВ для 1965 – 2010 гг., используя данные работы [1]. На фазе спада 20 – 23 циклов в 1974, 1984, 1994 и 2003 гг. зарегистрированы самые высокие среднегодовые величины  $Kp$ -индекса (среднесуточная величина  $Kp = 23,5$ ). В эти годы среднегодовое количество высокоскоростных потоков СВ превышает количество корональных выбросов в среднем  $\sim 6$  раз [1], геомагнитная активность формируется высокоскоростными потоками. В 1971, 1979, 1989 и 2001 гг. (периоды вблизи максимумов 20 – 23 циклов) среднегодовое количество корональных выбросов превышает количество высокоскоростных потоков в среднем  $\sim 8$  раз, геомагнитная активность формируется корональными выбросами (средняя величина  $Kp = 18,7$ ). Среднегодовые величины  $Kp$ -индекса, сформированные корональными вы-

бросами вблизи максимума солнечного цикла, в среднем меньше величин  $Kp$ -индексов, сформированных на фазе спада солнечного цикла. Экстремальная геомагнитная активность отмечена в 1991 г. (максимум 22 цикла). В 1991 г. зарегистрировано самое большое число корональных выбросов (~40), сопровождавшихся магнитными бурями  $\geq G3$  ( $Kp \geq 7$ ). В 1991 г.  $Kp = 24,05$ , это максимальная среднегодовая величина  $Kp$  для максимумов циклов за 1932 – 2010 гг. На фазе спада солнечного цикла геомагнитная активность, в основном, связана с воздействием высокоскоростных потоков СВ. В 1973 – 1977 гг. (20 цикл) высокоскоростные потоки наблюдались ~60% времени, корональные выбросы <10%. Эти величины соответственно равны ~35% и <5% для 1984 – 1987 гг. (21 цикл) и ~45% и <5% для 1994 – 1997 гг. (22 цикл) [10].

### Сезонные вариации $Kp$ -индекса

При анализе вариаций геомагнитной активности обычно рассматриваются несколько факторов, определяющих эффективность передачи энергии от СВ к магнитосфере: гелиоширота Земли, гелиоширота основных управляющих структур СВ и их динамика, знак магнитного поля Солнца. Геомагнитная активность отражает суммарный эффект влияния различных источников. Для выделения типа явлений, вызывающих наиболее значительные вариации геомагнитной активности, проведён спектральный анализ суточных значений  $Kp$ -индекса за 1932 – 2014 гг. Результаты представлены на рис. 2. Наибольшая плотность спектра мощности, значительно превышающая среднюю мощность 27 дневных вариаций, наблюдается для периодов ~183 суток (полугодичная вариация). С учётом этого результата для каждого года был проведён анализ динамики  $Kp$ -индекса. Для примера на рис. 3 приведены суточные вариации  $Kp$ -индекса для 1994 г. и 2003 г. Как было показано, геомагнитная активность в эти годы (на фазе спада солнечных циклов) связана с высокоскоростными потоками СВ. Эти годы значительно различаются по годовому распределению суточных величин  $Kp$ : в 1994 г. видна значительная асимметрия в распределении (максимумы суточных величин  $Kp$  приходятся на весну и осень); в 2003 г. распределение более равномерное. Для выделения сезонных вариаций для каждого года проведён анализ суточных распределений  $Kp$ -индекса. Результаты представлены на рис. 1. По типу внутригодовых распределений  $Kp$ -индекса на рис. 1 цветными маркерами отмечены годы: зелёный треугольник – значительные вариации весна –

осень; красный треугольник – нерегулярная динамика; синий треугольник – вариации слабые. На рис. 4 показана динамика  $Kp$ -индекса для трёх видов годовых распределений величин  $Kp$ -индекса: для событий с сильными вариациями годовых распределений (усреднение по 34 событиям), для событий с нерегулярной динамикой  $Kp$ -индекса (усреднение по 15 событиям) и для промежуточных случаев, вариации слабые (усреднение по 34 событиям). Статистика такая: за 83 года (7 солнечных циклов) сезонные вариации разной амплитуды наблюдаются в 68 случаях (82% от общего количества) и в 15 (18%) случаях сезонные вариации не наблюдаются. Годовое распределение числа случаев (лет) по типу сезонных вариаций очень неравномерно, изменяется от цикла к циклу, слабо зависит от фазы солнечного цикла и не зависит от направления магнитного поля Солнца (за время 7 циклов магнитное поле несколько раз меняло знак). На фазе возрастания солнечных циклов (17 лет) в 59% случаях регистрируются значительные сезонные вариации, для 35% случаев вариации слабые, в 6% случаях вариации не наблюдаются. Для фазы спада циклов (39 лет) эти величины соответственно равны: 39%, 11% и 11%; для максимума активности (18 лет) – 43%, 28% и 28%. Можно выделить солнечные циклы, для которых на фазе спада устойчиво регистрируется определённый тип годового распределения  $Kp$ -индекса: для 17, 18 и 22 циклов регистрируются значительные сезонные вариации, для 23 цикла – отсутствие сезонных вариаций.

Вариации геомагнитной активности сопровождаются общей перестройкой структуры магнитосферы [11, 12]. В ряду целого ряда процессов, вызванных увеличением геомагнитной активности, наиболее значительным событием является перестройка структуры внешнего радиационного пояса (ВРПЗ), увеличение потоков электронов в широком диапазоне энергий (от десятков кэВ до десятков МэВ) и в связи с этим увеличение интенсивности высыпания части электронов в ионосферу. Динамика потоков энергичных электронов ВРПЗ, интенсивность и продолжительность высыпания электронов из радиационного пояса в ионосферу зависят от степени возмущённости геомагнитного поля [13 – 17]. Высыпающиеся заряженные частицы создают в ионосфере дополнительную ионизацию, что приводит к усилению поглощения космического радиоизлучения при его прохождении через

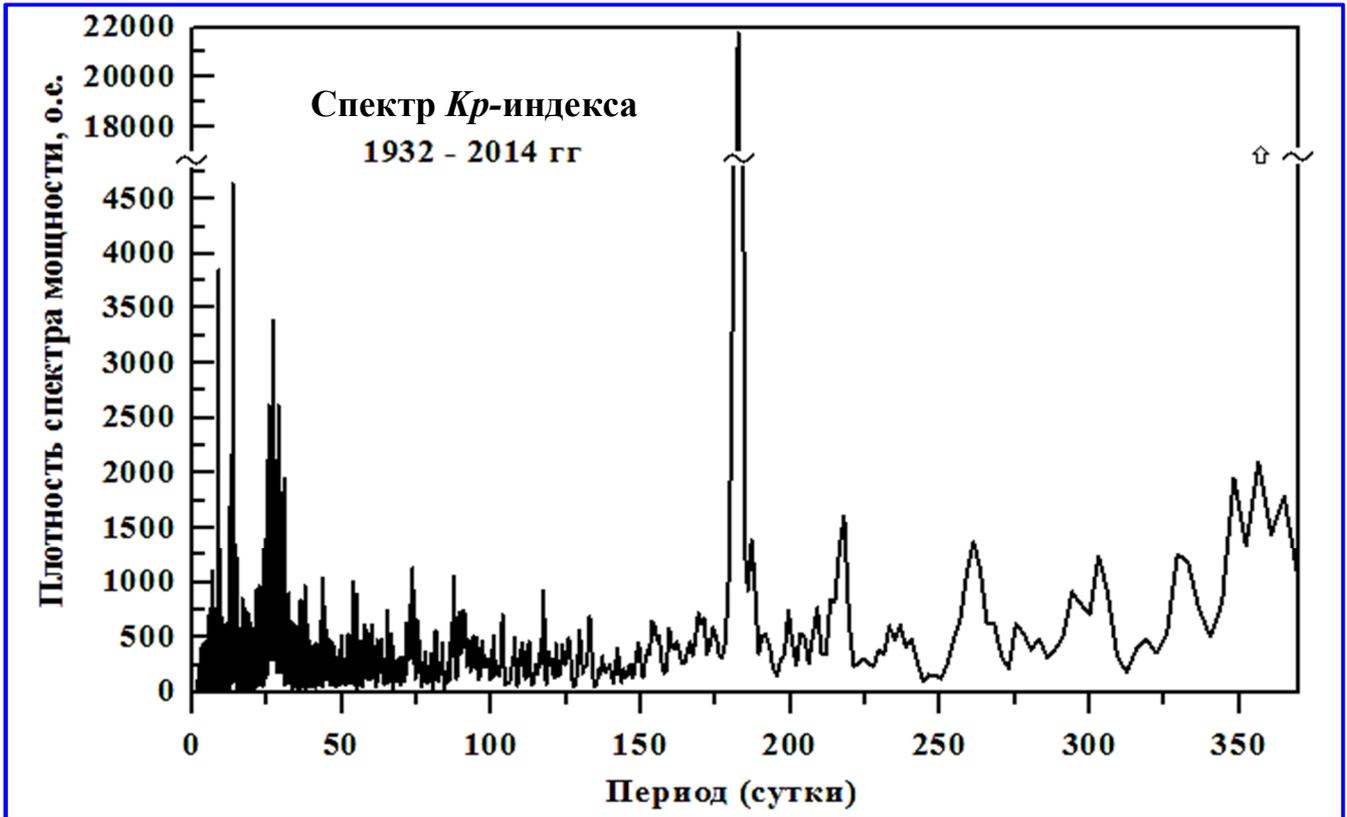


Рис. 2. Плотность спектра мощности флуктуаций *Кр*-индекса геомагнитной активности в относительных единицах

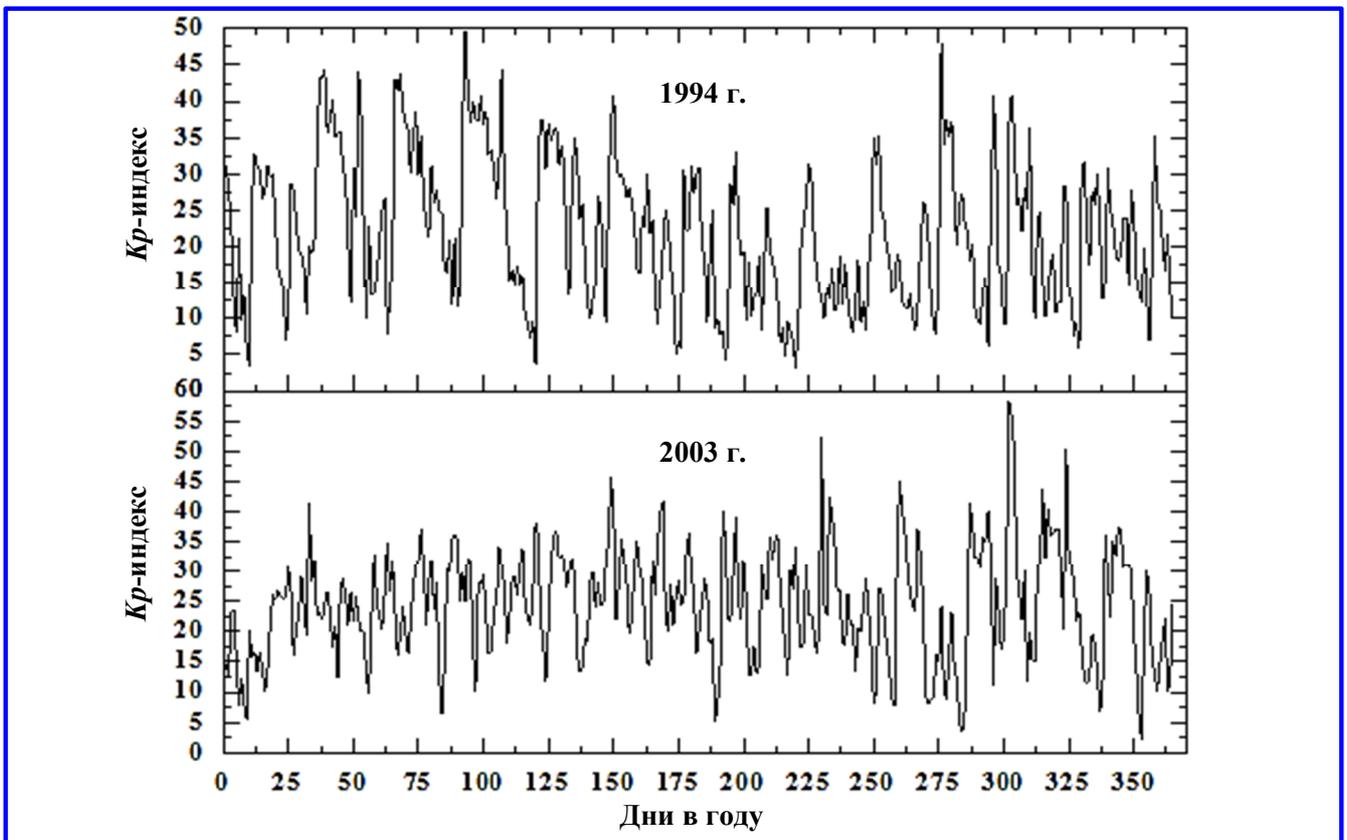


Рис. 3. Суточные значения *Кр*-индекса геомагнитной активности за 1994 и 2003 гг.

ионосферу. Примеры влияния вариаций геомагнитной активности на интенсивность потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и продолжительность высыпаний энергичных электронов представлены на рис. 5 [18]. Динамика  $Kp$ -индекса для фазы спада 22 цикла (1993 – 1997 гг.) была получена методом наложения эпох при усреднении за 5 лет суточных величин  $Kp$ -индекса. Результаты представлены на рис. 5 (1). Средние за 5 лет сезонные вариации весна – осень для  $Kp$ -индекса равны  $\sim 10\%$ , а глубина модуляции весна – лето равна  $\sim 25\%$ . Следует отметить, что эта величина близка к среднему значению величины модуляции  $a_p$ -индекса ( $\sim 21\%$ ) для периода 1993 – 2003 гг., полученной в работе [19]. Для сравнения с вариациями  $Kp$ -индекса на рис. 5 (2) показаны вариации продолжительности высыпаний электронов за 1993 – 1997 гг. по данным риометрической станции п. Тикси (географические координаты  $71^\circ 58' N$ ,  $129^\circ 00' E$ ; геомагнитные координаты  $65^\circ 20' N$ ,  $194^\circ 80' E$ ; магнитная оболочка  $L \approx 6$ ). На рис. 5 (3) показаны вариации интенсивности потоков электронов  $>2$  МэВ на геостационарной орбите по данным спутника GOES. Результаты получены методом наложения эпох (аналогично  $Kp$ -индексу) при усреднении суточных величин за 5 лет. Максимумы усреднённых суточных величин этих параметров приходятся на весну и осень. Вариации весна – осень составляют  $\sim 25\%$  для потоков электронов и  $\sim 15\%$  для продолжительности высыпаний, соответствующие величины глубины модуляции (весна – лето) равны  $\sim 50\%$ . Следует отметить, что наблюдаемая сезонная динамика достаточно значительна. Сезонные вариации потоков электронов ВРПЗ и продолжительности высыпаний отражают динамику  $Kp$ -индекса. Анализ динамики  $Kp$ -индекса является основой для предсказания целого ряда процессов (часто опасных), возникающих в геопространстве при изменении геомагнитной активности.

Вариации геомагнитной активности (годовые, сезонные, дневные) зависят от изменения угла  $\psi$  между магнитным диполем и линией Солнце – Земля и от вариаций параметров потоков солнечного ветра (скорости, плотности, магнитного поля). Угол  $\psi$  определяет характер процессов, возникающих в магнитосфере при воздействии потоков СВ. При изменении угла  $\psi$  могут меняться размеры и форма магнитопаузы, структура магнитосферных токов, динамика кольцевого тока. Геомагнитные индексы дают численное описание определённых магнитосферных процессов. Динамика угла  $\psi$  фактически определяет динамику геомагнитных индексов, в частности динамику  $a_a$ -индекса (аналог

$Kp$ -индекса),  $A_p$ - и  $Dst$ -индексов [20 – 22]. В работе [19] предложена количественная модель для описания сезонных вариаций  $a_p$ -индекса. В модели для описания сезонных вариаций в качестве независимых параметров отдельно рассматривается влияние угла  $\psi$  и параметров СВ. В частности показано, что в среднем для периода 1963 – 2003 гг. сезонные вариации  $a_p$ -индекса составляют  $\sim 4$  нТ, из них только  $\sim 50\%$  вариаций определяются изменением угла  $\psi$ , остальные вариации связаны с изменениями параметров СВ. Функциональная форма зависимости амплитуды вариаций  $a_a$ -индекса от величины угла  $\psi$  рассмотрена в работе [20]. Анализ полугодичных вариаций  $a_a$ -индекса за 130 лет (1868 – 1998 гг.) проведён в работе [23]. Исследование динамики геомагнитной активности показало, что  $\sim 65$  –  $75\%$  полугодичных (сезонных) модуляций геомагнитных индексов связано с изменением угла  $\psi$  [22 – 24].

### Основные результаты

В работе проведён анализ динамики  $Kp$ -индекса для семи циклов солнечной активности (17 – 23 циклы, 1932 – 2014 гг.) Динамика среднегодовых величин  $Kp$ -индекса формируется как суммарный эффект воздействия на магнитосферу отдельных структур солнечного ветра. В работе показана связь динамики  $Kp$ -индекса с годовыми распределениями высокоскоростных потоков СВ и корональных выбросов. Показано, что вблизи максимумов солнечной активности среднегодовое число корональных выбросов  $\sim 8$  раз (среднее значение за 20 – 23 циклы) превышает число высокоскоростных потоков, среднегодовые величины  $Kp$ -индекса формируются корональными выбросами. Показано, что на фазе спада солнечной активности, среднегодовое число высокоскоростных потоков  $\sim 6$  раз (среднее значение за 20 – 23 циклы) превышает число корональных выбросов, среднегодовые величины  $Kp$ -индекса формируются высокоскоростными потоками СВ. Средние для семи циклов (17 – 23 циклы) суточные значения  $Kp$ -индекса на фазе подъёма, в максимуме активности и на фазе спада составляют  $Kp = 17,5$ ,  $Kp = 19,3$  и  $Kp = 20$ .

Для выделения сезонных вариаций в работе проведён анализ внутригодовых суточных распределений  $Kp$ -индекса. Годовое распределение числа случаев (лет) по типу сезонных вариаций (сильные вариации, незначительные и нерегулярные изменения) очень неравномерно и изменяется от цикла к циклу, слабо зависит от фазы солнечного цикла и не зависит от направления магнитного поля Солнца.

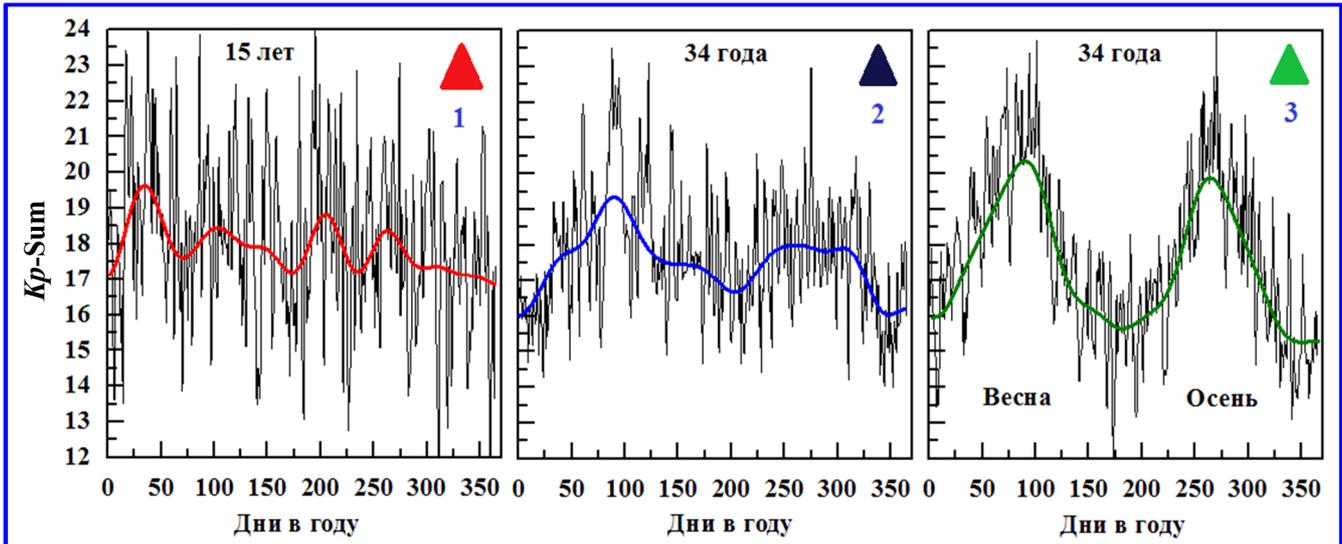


Рис. 4. Суточные значения  $Kp$ -индексов геомагнитной активности, усреднённые: 1 – за 15 лет (годы, выделенные красными треугольниками на рис. 1); 2 – за 34 года (годы, выделенные синими треугольниками на рис. 1); 3 – за 34 года (годы, выделенные зелёными треугольниками на рис. 1)

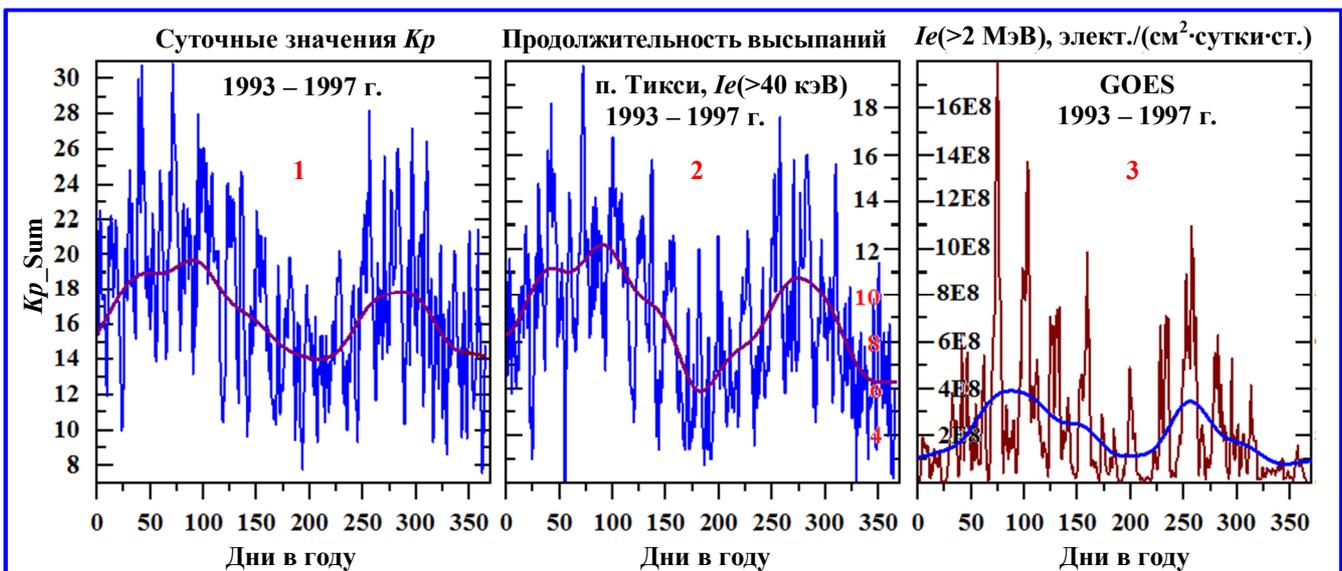


Рис. 5. Суточные значения (усреднённые за 5 лет): 1 –  $Kp$ -индекса геомагнитной активности; 2 – продолжительности высыпаний энергичных электронов; 3 – интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите

Статистика такова: за время с 17-го по 23-й солнечный цикл (всего около 80 лет) сильные сезонные вариации наблюдаются в 34 случаях (41% от общего количества), вариации отсутствуют для 15 случаев (18%). Получены средние величины вариаций для каждой фазы солнечного цикла. На фазе возрастания солнечных циклов (в сумме 17 лет) в 59% случаях регистрируются значительные сезонные вариации, в 6% случаях вариации не наблюдаются. Для максимума активности (в сумме 18 лет) эти величины равны соответственно 43% и 28%; для фазы спада циклов (в сумме 39 лет) эти величины равны 39% и 11%.

В работе показана связь сезонных вариаций потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите и продолжительности высыпания заряженных электронов с вариациями  $Kp$ -индекса. Вычислены средние за пять лет (1993 – 1997 гг.) величины: суточная динамика  $Kp$ -индекса, интенсивность потоков электронов  $>2$  МэВ и продолжительность высыпания электронов. Максимумы усреднённых суточных величин всех параметров приходятся на весну и осень. Вариации весна – осень составляют  $\sim 25\%$  для потоков электронов и  $\sim 15\%$  для продолжительности высыпаний, соответствующие величины глубины модуляции (весна – лето) равны  $\sim 50\%$ .

## Литература

1. Ian G. Richardson, and Hilary V. Cane Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // *J. Space Weather Space Clim.* – 2012. – V. 2. – Article Number A01. – doi:10.1051/swsc/2012001.
2. Echer E., W. D. Gonzalez and M. V. Alves On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // *Space Weather.* – 2006. – V. 4. – S06001. – doi:10.1029/2005SW000200.
3. Thomsen M. F. Why  $Kp$  is such a good measure of magnetospheric convection // *Space Weather.* – 2004. – V. 2. – S11004. – doi:10.1029/2004SW000089.
4. Sean Bruinsma The DTM-2013 thermosphere model // *J. Space Weather Space Clim.* – 2015. – V. 5. – A1. – <https://doi.org/10.1051/swsc/2015001>.
5. Heilig B, Lühr H. New plasmapause model derived from CHAMP field-aligned current signatures // *Ann. Geophys.* – 2013. – V. 31. – P. 529–539. – doi:10.5194/angeo-31-529-2013.
6. Zhang Y, Paxton L. J. An empirical  $Kp$ -dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2008. – V. 70. – Issue 8 – 9. – P. 1231 – 1242. – doi:10.1016/j.jastp.2008.03.008.
7. Ozeke L. G., Mann I. R., Murphy K. R. ULF wave derived radiation belt radial diffusion coefficients / L. G. Ozeke, I. R. Mann, K. R. Murphy, I. J. Rae, D. K. Milling, S. R. Elkington, A. A. Chan, and H. J. Singer // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A04222. – doi:10.1029/2011JA017463.
8. Su Z., Xiao F., Zheng H., and Wang S. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116. – A04205. – doi:10.1029/2010JA016228.
9. Choi H.-S., Lee J., Cho K.-S. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships / H.-S. Choi, J. Lee, K.-S. Cho, Y.-S. Kwak, I.-H. Cho, Y.-D. Park, Y.-H. Kim, D. N. Baker, G. D. Reeves and D.-K. Lee // *Space Weather.* – 2011. – V. 9. – S06001. – doi:10.1029/2010SW000597.
10. Ian G. Richardson and Hilary V. Cane J. Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963 – 2011) // *Space Weather Space Clim.* – 2012. – V. 2. – Article number A02. – doi:10.1051/swsc/2012003.
11. Li L. Y., Cao J. B., Zhou G. C. and X. Li 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.
12. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А.А. [и др.] Влияние рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на формирование структуры энергетических спектров электронов на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, М. Н. Будяк, М. В. Кожухов, В. Т. Семёнов // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 33 – 49. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201703.pdf>.
13. Zhao H., Baker D. N., Jaynes A. N., Li X., Elkington S. R., Kanekal S. G., Spence H. E., Boyd A. J., Huang C.-L. and C. Forsyth On the relation between radiation belt electrons and solar wind parameters/geomagnetic indices: Dependence on the first adiabatic invariant and  $L^*$  // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – P. 1624 – 1642. – doi:10.1002/2016JA023658.
14. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А.А. Влияние скорости и плотности рекуррентных потоков солнечного ветра и индексов геомагнитной активности ( $Kp$ -и  $Dst$ -индексов) на формирование структуры потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. –Т. 164. –№ 3. – С. 3 – 18.
15. Кузьмин В. А., Соколов В. Д., Безродных И. П. Вариации частоты высыпания частиц в 22 цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2000. – Т. 40. – № 6. – С. 103 –106.
16. Кошляк И. В. Соколов В. Д., Самсонов С. Н. Связь частоты появления риометрического поглощения с потоками релятивистских электронов на геостационарной орбите // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2002. – Т. 42. – № 5. – С. 631 – 634.
17. Kavanagh, A. J., Honary F., Donovan E. F., Ulich T. and Denton M. H. Key features of >30 keV electron precipitation during high speed solar wind streams: A superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117. – A00L09. – doi:10.1029/2011JA017320.
18. Кузьмин В. А., Соколов В. Д., Безродных И. П. Динамика спектра мощности частоты высыпания в авральной ионосфере в период фазы спада и минимума 22-го цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2000. – Т. 40. – № 3. – С. 114 – 118.
19. Petrukovich A. A. and Zakharov M. Y. ap-index solar wind driving function and its semiannual variations // *Ann. Geophys.* – 2007. – V. 25. – P. 1465 – 1469. – URL: [www.ann-geophys.net/25/1465/2007](http://www.ann-geophys.net/25/1465/2007).
20. Svalgaard L., Cliver E. W. and Ling A. G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – V. 29 (16). – P. 1765. – doi:10.1029/2001GL014145.
21. O'Brien T. P. and McPherron R. L. Seasonal and diurnal variation of Dst-dynamics // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2002. – V. 107(A11). – P. 1341. – doi:10.1029/2002JA009435.
22. Green C. A. The semiannual variation in the magnetic activity indices  $Aa$  and  $Ap$  // *Planet. Space Sci.* – 1984. – V. 32. – issue 3. – P. 297 – 305.
23. Cliver E. W., Kamide Y. and Ling A. G. The semiannual variation of geomagnetic activity: Phases and profiles for 130 years of  $aa$  data // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – V. 64. – P. 47 – 53.
24. Lyatsky W., Newell P. T. and Hamza A. Solar illumination as cause of the equinoctial preference for geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – V. 28. – P. 2353 – 2356.

Поступила в редакцию 04.10.2018

**Иннокентий Петрович Безродных**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

**Евгения Ивановна Морозова**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

**Анатолий Алексеевич Петрукович**, член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН,  
т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.  
(ИКИ РАН).

**Максим Владимирович Кожухов**, кандидат технических наук, начальник лаборатории,  
т. (495) 366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

**Юрий Сергеевич Павлов**, доктор технических наук, заведующий лабораторией,  
e-mail: rad05@bk.ru.  
(ИФХЭ РАН).

## DYNAMICS OF K<sub>p</sub>-INDEX OF GEOMAGNETIC ACTIVITY FOR SEVEN SOLAR CYCLES (OVER THE PERIOD OF 1932 – 2014). SEASONAL VARIATIONS

I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich,  
M. V. Kozhukhov, Iu. S. Pavlov

*The paper shows the relation of the dynamics of the geomagnetic activity K<sub>p</sub>-index with annual distributions of high-speed solar wind fluxes and coronal mass ejection. It is shown that near the maxima of solar activity, the average annual number of coronal mass ejection ~ 8 times (the average value for 20 – 23 cycles) exceeds the number of high-speed fluxes, during these periods the average annual values of the K<sub>p</sub>-index are formed by coronal mass ejection. It is shown that during the decay phase of solar activity, the average annual number of high-speed fluxes is ~ 6 times (the average value for 20 – 23 cycles) exceeds the number of coronal mass ejection, during these periods the average annual values of K<sub>p</sub>-index are formed by solar wind high-speed fluxes. To pick out seasonal variations in the work, an analysis of the intra-annual distributions of the K<sub>p</sub>-index diurnal values is carried out. The annual distribution of the number of cases (years) according to the type of seasonal variations (strong variations, minor and irregular changes) is very uneven and varies from cycle to cycle, depends little on the phase of the solar cycle and does not depend on the direction of the Sun magnetic field. During 7 solar cycles (83 years), strong seasonal variations are observed in 34 cases (41% of the total), no variations for 15 cases (18%). The average values of the K<sub>p</sub>-index variations for each phase of the solar cycle are obtained. The relation seasonal variations in outer radiation belt relativistic electron fluxes and the duration of the outer radiation belt energetic electron precipitation in the ionosphere with seasonal variations of the K<sub>p</sub>-index is shown.*

**Key words:** seasonal variations of geomagnetic activity, relativistic electron fluxes, ionosphere, Earth's magnetosphere.

### References

1. Ian G. Richardson and Hilary V. Cane Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // J. Space Weather Space Clim. – 2012. – V. 2. – Article Number A01. – doi:10.1051/swsc/2012001.
2. Echer E., W. D. Gonzalez and M. V. Alves On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // Space Weather. – 2006. – V. 4. – S06001. – doi:10.1029/2005SW000200.
3. Thomsen M. F. Why K<sub>p</sub> is such a good measure of magnetospheric convection // Space Weather. – 2004. – V. 2. – S11004. – doi:10.1029/2004SW000089.
4. Sean Bruinsma The DTM-2013 thermosphere model // J. Space Weather Space Clim. – 2015. – V. 5. – A1. – <https://doi.org/10.1051/swsc/2015001>.
5. Heilig B, Lühr H. New plasmopause model derived from CHAMP field-aligned current signatures // Ann. Geophys. – 2013. – V. 31. – P. 529 – 539. – doi:10.5194/angeo-31-529-2013.
6. Zhang Y, Paxton L. J. An empirical K<sub>p</sub>-dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2008. – V. 70. – Issue 8 – 9. – P. 1231 – 1242. – doi:10.1016/j.jastp.2008.03.008.
7. Ozeke L. G., Mann I. R., Murphy K. R. ULF wave derived radiation belt radial diffusion coefficients / L. G. Ozeke, I. R. Mann, K. R. Murphy, I. J. Rae, D. K. Milling, S. R. Elkington, A. A. Chan, and H. J. Singer // J. Geophys. Res. – 2012. – V. 117. – A04222. – doi:10.1029/2011JA017463.
8. Su Z., Xiao F., Zheng H., and Wang S. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions // J. Geophys. Res. – 2011. – V. 116. – A04205. – doi:10.1029/2010JA016228.
9. Choi H.-S., Lee J., Cho K.-S. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships / H.-S. Choi, J. Lee, K.-S. Cho, Y.-S. Kwak, I.-H. Cho, Y.-D. Park, Y.-H. Kim, D. N. Baker, G. D. Reeves and D.-K. Lee // Space Weather. – 2011. – V. 9. – S06001. – doi:10.1029/2010SW000597.
10. Ian G. Richardson and Hilary V. Cane J. Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963 – 2011) // Space Weather Space Clim. – 2012. – V. 2. – Article number A02. – doi:10.1051/swsc/2012003.

11. Li L. Y., Cao J. B., Zhou G. C. and X. Li 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.
12. Bezrodnykh I. P., Morozova E. I., Petrukovich A. A. [et al.] Influence of recurrent high-speed solar wind fluxes on formation of electron energy spectrum structure in geostationary orbit / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich, M. N. Budiak, M. V. Kozhukhov, V. T. Semenov // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings.* – M. : JC «VNIIEM Corporation», 2017. – Vol. 156. – No. 1. – Pp. 33 – 49. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201703.pdf>.
13. Zhao H., Baker D. N., Jaynes A. N., Li X., Elkington S. R., Kanekal S. G., Spence H. E., Boyd A. J., Huang C.-L. and C. Forsyth On the relation between radiation belt electrons and solar wind parameters/geomagnetic indices: Dependence on the first adiabatic invariant and  $L^*$  // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – P. 1624 – 1642. – doi:10.1002/2016JA023658.
14. Bezrodnykh I. P., Morozova E. I., Petrukovich A. A. Influence of speed and density of recurrent solar wind fluxes and geomagnetic activity indices ( $Kp$  and  $Dst$ ) on formation of structure of outer Earth radiation belt electron fluxes in geostationary orbit // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings.* – M. : JC «VNIIEM Corporation», 2018. – Vol. 164. – No. 3. – Pp. 3 – 18.
15. Kuzmin V. A., Sokolov V. D., Bezrodnykh I. P. Variations of particle precipitation frequency in 22<sup>nd</sup> cycle of solar activity // *Geomagnetism and aeronomy.* – 2000. – Vol. 40. – No. 6. – Pp. 103 – 106.
16. Koshliak I. V., Sokolov V. D., Samsonov S. N. Relation between the frequency of radiometric absorption and relativistic electron fluxes in geostationary orbit // *Geomagnetism and aeronomy.* – 2002. – Vol. 42. – No. 5. – Pp. 631 – 634.
17. Kavanagh, A. J., Honary F., Donovan E. F., Ulich T. and Denton M. H. Key features of >30 keV electron precipitation during high speed solar wind streams: A superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117. – A00L09. – doi:10.1029/2011JA017320.
18. Kuzmin V. A., Sokolov V. D., Bezrodnykh I. P. Dynamics of power spectrum of frequency of precipitation in the auroral ionosphere during the decay period and minimum of 22<sup>nd</sup> cycle of solar activity // *Geomagnetism and aeronomy.* – 2000. – Vol. 40. – No. 3. – Pp. 114 – 118.
19. Petrukovich A. A. and Zakharov M. Y. ap-index solar wind driving function and its semiannual variations // *Ann. Geophys.* – 2007. – V. 25. – P. 1465 – 1469. – URL: [www.ann-geophys.net/25/1465/2007](http://www.ann-geophys.net/25/1465/2007).
20. Svalgaard L., Cliver E. W. and Ling A. G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – V. 29 (16). – P. 1765. – doi:10.1029/2001GL014145.
21. O'Brien T. P. and McPherron R. L. Seasonal and diurnal variation of  $Dst$ -dynamics // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2002. – V. 107(A11). – P. 1341. – doi:10.1029/2002JA009435.
22. Green C. A. The semiannual variation in the magnetic activity indices  $Aa$  and  $Ap$  // *Planet. Space Sci.* – 1984. – V. 32. – issue 3. – P. 297 – 305.
23. Cliver E. W., Kamide Y. and Ling A. G. The semiannual variation of geomagnetic activity: Phases and profiles for 130 years of  $aa$  data // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – V. 64. – P. 47 – 53.
24. Lyatsky W., Newell P. T. and Hamza A. Solar illumination as cause of the equinoctial preference for geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – V. 28. – P. 2353 – 2356.

**Innokentii Petrovich Bezrodnykh**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: [d54x@mail.ru](mailto:d54x@mail.ru).  
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).  
(JC «VNIIEM Corporation»).

**Evgeniia Ivanovna Morozova**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: [morozova.evgeniya2014@yandex.ru](mailto:morozova.evgeniya2014@yandex.ru).

**Anatolii Alexeevich Petrukovich**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,  
Deputy Director General of IKI RAN, tel.: + 7 (495) 333-32-67, e-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru).  
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).

**Maxim Vladimirovich Kozhukhov**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,  
tel.: (495)366-38-38, e-mail: [d18188@mail.ru](mailto:d18188@mail.ru).  
(JC «VNIIEM Corporation»).

**Iurii Sergeevich Pavlov**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Head of Laboratory, e-mail: [rad05@bk.ru](mailto:rad05@bk.ru).  
(Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS).