

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

В работе показана связь динамики Кр-индекса геомагнитной активности с годовыми распределениями высокоскоростных потоков СВ и корональных выбросов. Показано, что вблизи максимумов солнечной активности среднегодовое число корональных выбросов ~ в 8 раз (среднее значение за 20 – 23 цикла) 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 цикла) превышает число корональных выбросов, среднегодовые величины Кр-индекса формируются высокоскоростными потоками плазмы солнечного ветра. Для выделения сезонных вариации 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. Кр-индекс геомагнитной активности, как численная мера вариаций магнитного поля используется при рассмотрении связи магнитосферных процессов с геомагнитной активностью. Планетарный Кр-индекс, характеризует глобальную возмущенность 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 возмущенности 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; очень сильные бури, уровень G4, $Kp = 8$, 1 буря в 1,5 – 2 месяца; 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 г. были получены следующие данные. Для 727 высокоскоростных потоков величина $Kp < 4+$ зафиксирована для 29% событий, $4 \leq Kp \leq 5+$ – для 35,6% событий, $5+ < Kp < 7o$ – для 29,7% событий, $Kp > 7o$ – для 5,6% событий. Для 170 корональных выбросов $Kp < 4+$ зафиксировано для 14,7% событий, $4 \leq Kp \leq 5+$ – для 19,4%, $5+ < Kp < 7o$ – для 29,4% событий, $Kp > 7o$ – для 36,5% событий. Это означает, что для магнитных бурь типа G3 и G4 эффективность корональных выбросов почти в 7 раз выше по сравнению эффективностью с 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 аврорального высыпания электронов внешнего радиационного пояса Земли [6]. По измерениям на спутниках (AMPTE, GOES) была установлена

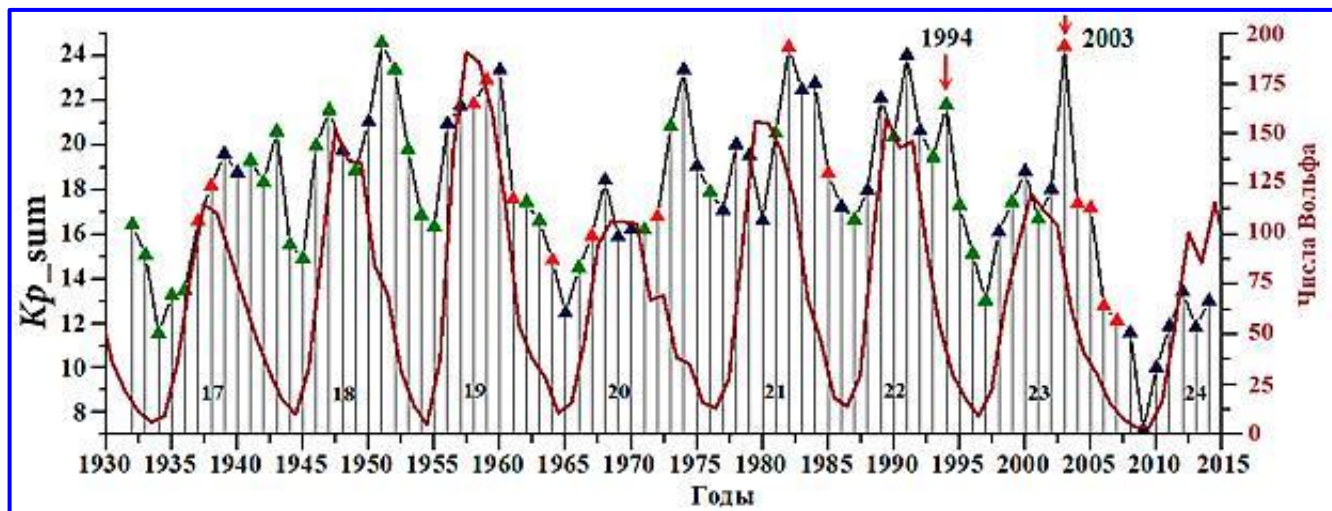


Рис. 1. Среднесуточные значения Kp -индексов за период с 1932 по 2014 гг. Зелеными треугольниками отмечены года, когда наблюдались значительные сезонные вариации Kp -индекса геомагнитной активности. Синим цветом – года, когда сезонные вариации были почти не заметны. Красным цветом – года, когда сезонные 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 цик-

ла на фазе подъема. 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 подъема, 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 (СВ). 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 ~ 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 ~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, проведен 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 проведен анализ динамики Kp -индекса. Для примера на рис. 3 приведены суточные вариации Kp -индекса для 1994 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 видна значительная асимметрия в распределении (максимумы суточных величин Kp приходятся на весну и осень); в 2003 г. распределение более равномерное. Для выделения сезонных вариации для каждого года проведен анализ суточных распределений Kp -индекса. Результаты представлены на рис. 1. По типу внутригодовых распределений Kp -индекса на рис. 1 цветными маркерами отмечены годы: зеле-

ный 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 такова: 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 возмущенности геомагнитного поля [13 – 17]. Высыпающиеся заряженные частицы создают в ионосфере дополнительную ионизацию, что приводит к усилению поглощения космического радиоизлучения при его прохождении через

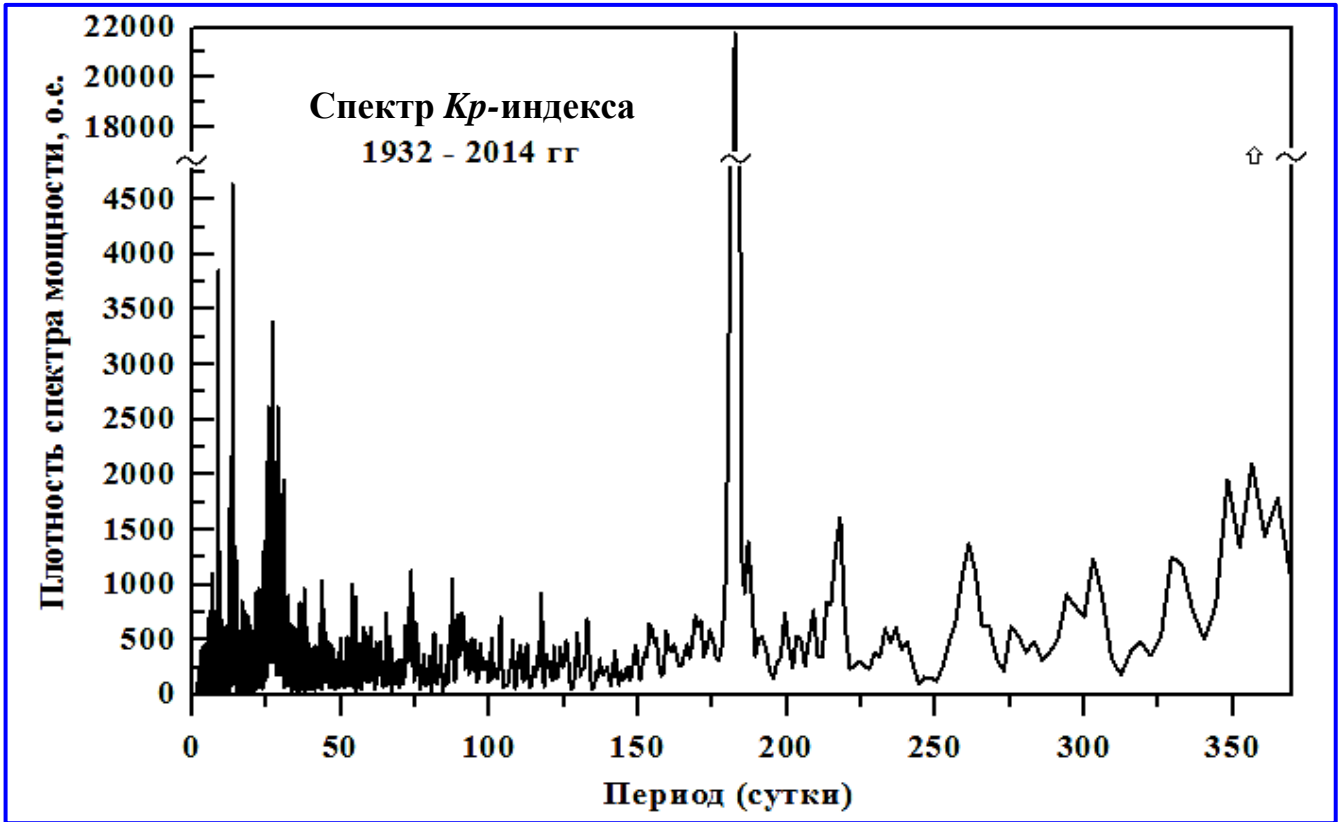


Рис. 2. Плотность спектра мощности флуктуаций *Kp*-индекса геомагнитной активности в относительных единицах

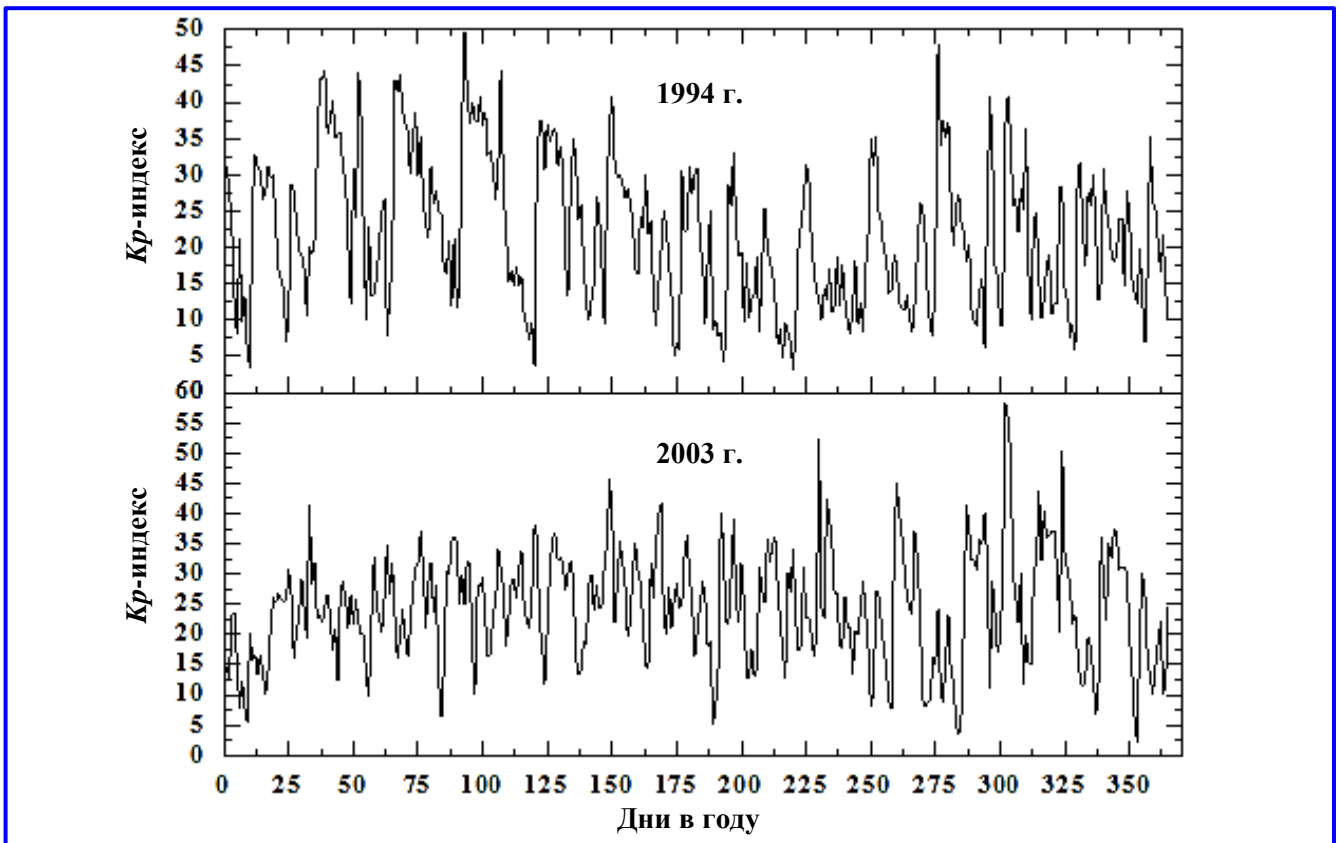


Рис. 3. Суточные значения *Kp*-индекса геомагнитной активности за 1994 и 2003 годы

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 г., 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 усредненных 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 ψ между магнитным диполем и линией Солнце – Земля и от вариаций параметров потоков солнечного ветра (скорости, плотности, магнитного поля). Угол ψ определяет характер процессов, возникающих в магнитосфере при воздействии потоков СВ. При изменении угла ψ могут меняться размеры и форма магнитопаузы, структура магнитосферных токов, динамика кольцевого тока. Геомагнитные индексы дают численное описание определенных магнитосферных процессов. Динамика угла ψ фактически определяет динамику геомагнитных индексов, в частности динамику a_p -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 ψ и параметров СВ. В частности показано, что в среднем для периода 1963 – 2003 гг. сезонные вариации a_p -индекса составляют ~ 4 нТ, из них только $\sim 50\%$ вариаций определяются изменением угла ψ , остальные вариации связаны с изменениями параметров СВ. Функциональная форма зависимости амплитуды вариаций a_p -индекса от величины угла ψ рассмотрена в работе [20]. Анализ полугодичных вариаций a_p -индекса за 130 лет (1868 – 1998 гг.) проведен в работе [23]. Исследование динамики геомагнитной активности показало, что ~ 65 – 75% полугодичных (сезонных) модуляций геомагнитных индексов связано с изменением угла ψ [22 – 24].

Основные результаты

В работе проведен 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 ~ 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 ~ 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 подъема, в максимуме активности и на фазе спада составляют $Kp = 17,5$, $Kp = 19,3$ и $Kp = 20$.

Для выделения сезонных вариации в работе проведен 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.

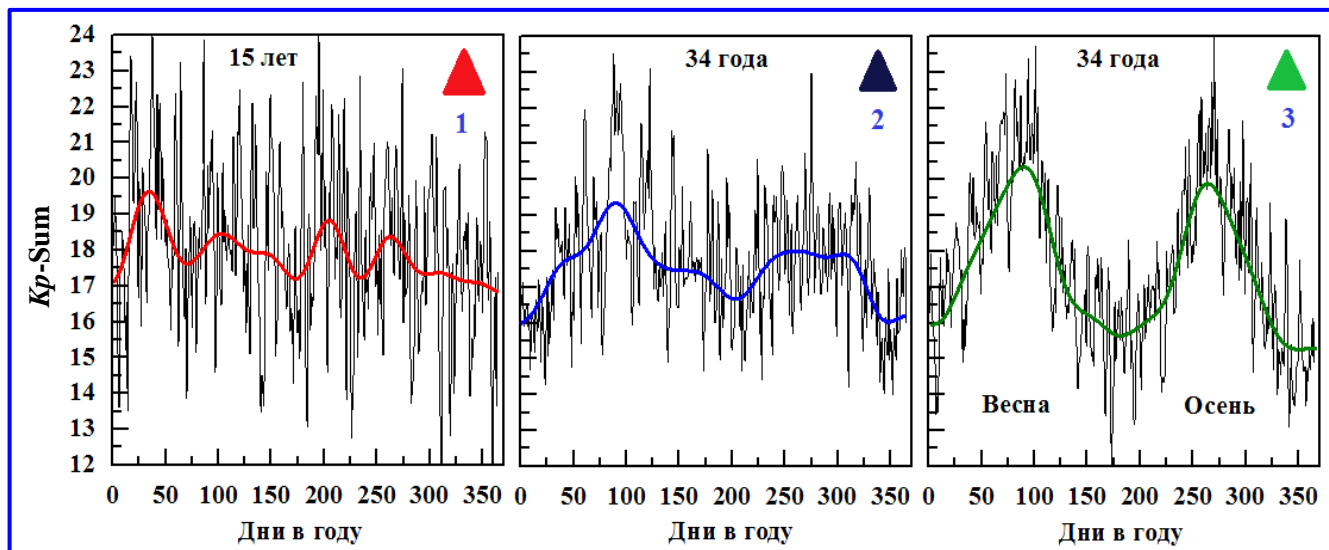


Рис. 4. Суточные значения K_p -индексов геомагнитной активности, усредненные: 1 – за 15 лет (годы, выделенные красными треугольниками на рис. 1); 2 – за 34 года (годы, выделенные синими треугольниками на рис. 1); 3 – за 34 года (годы, выделенные зелеными треугольниками на рис. 1)

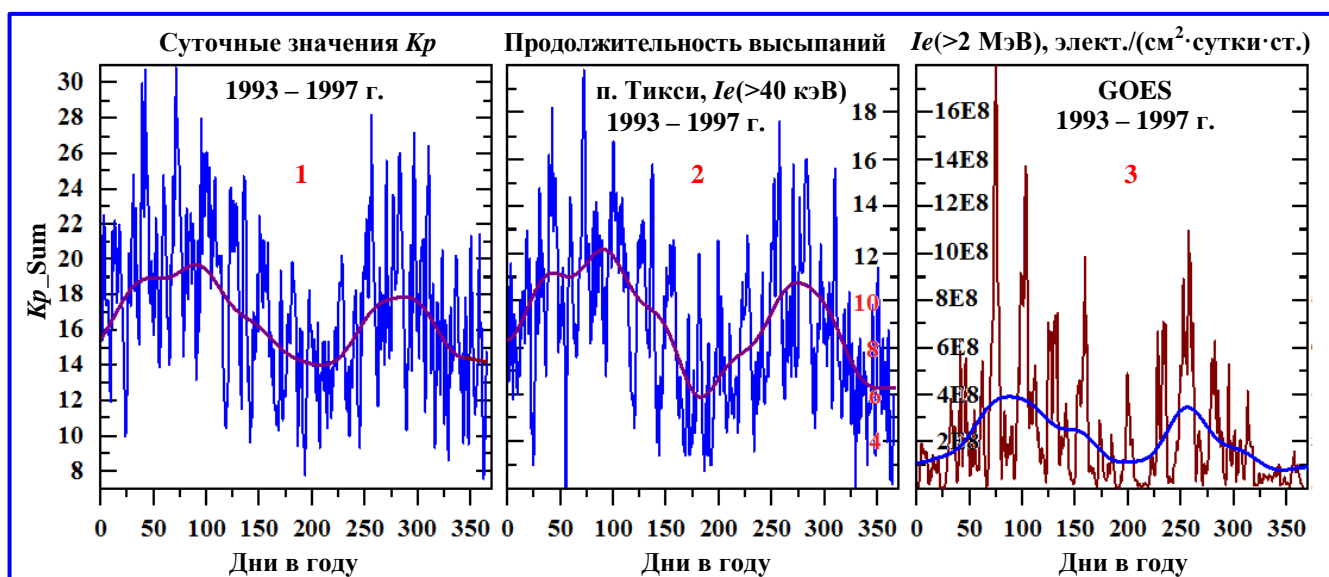


Рис. 5. Суточные значения (усреднённые за 5 лет): 1 – K_p -индекса геомагнитной активности; 2 – продолжительность высыпаний энергичных электронов; 3 – интенсивность потока релятивистских электронов на геостационарной орбите

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 K_p -индекса. Вычислены средние за пять лет (1993 – 1997 гг.) величины: суточная динамика K_p -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 ~25% для потоков электронов и ~15% для продолжительности высыпаний, соответствующие величины глубины модуляции (весна – лето) равны ~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 аэрономия.* – 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 аэрономия.* – 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 electronprecipitation 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 аэрономия.* – 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.
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.

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).