

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 523.98

ДИНАМИКА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВАРИАЦИЙ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И Kp -ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ВОСЬМИ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (1932 – 2018 гг.)

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

Временная структура вариаций солнечной активности отражает суммарный эффект влияния целого ряда процессов возникновения и развития магнитного поля Солнца. Эти процессы формируют основные базисные характеристики динамики солнечной активности, в частности солнечные циклы и структуру солнечных циклов. Физические механизмы, управляющие динамикой солнечной активности, недостаточно изучены. Характерная черта динамики солнечной активности – наличие квазипериодических вариаций в структуре вариаций основных параметров (числа солнечных пятен, магнитного поля, электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах). Общим в структуре вариаций для всех параметров является нерегулярное возникновение периодических структур, переменные амплитудная и временная шкалы вариаций. Как отклик на вариации солнечных параметров квазипериодические вариации регистрируются в динамике индексов геомагнитной активности. В настоящее время полагают, что квазипериодические вариации с периодами $\sim 1 - 11$ гг. в структуре солнечных параметров отражают динамику развития двух различных динамо-процессов, определяющих формирование магнитного поля Солнца и, следовательно, динамику солнечной активности. В работе проведен анализ временной структуры амплитуды вариаций числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности в частотном диапазоне $\sim 1.0E-3 - 4.5E-3$ 1/сут (периоды $\sim 0,6 - 2,7$ гг.) для 1932 – 2018 гг. Проведено сравнение динамики вариаций локальных максимумов и минимумов числа солнечных пятен и вариаций локальных максимумов и минимумов величин Kp -индекса с динамикой абсолютных величин соответствующих параметров. Динамика амплитуды вариаций δSSN и δKp (как долговременная, так и внутри цикла) не зависит от динамики числа солнечных пятен и от динамики Kp -индекса. В вариациях амплитуды δSSN для периодов 2,3 г., 1,09 г. и 0,7 г. выделены периодические вариации ~ 11 г., для периода 1,7 г. – слабые квазипериодические вариации $\sim 12 - 16$ гг. Эффект Гневышева (Gnevyshev Gap) зарегистрирован в динамике амплитуды вариаций δSSN (18-й – 21-й циклы) для частоты $2.5E-3$ 1/сут и частоты $4.5E-3$ 1/сут. Внутри солнечных циклов регистрируется два максимума амплитуды: один вблизи максимума активности, другой \sim через 2 – 3 года, – в промежутке между ними амплитуды вариаций значительно снижаются. Подобная динамика для этих частот зарегистрирована и в динамике амплитуды вариаций δKp в 17-м – 23-м циклах, эти вариации в δKp и δSSN регистрируются одновременно. В динамике амплитуды вариаций δSSN для частоты $3.8E-3$ 1/сут внутри 17-го, 19-го, 21-го – 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δSSN : первый – вблизи максимума цикла, второй \sim через 4,2 года. В структуре амплитуды вариаций δKp внутри 17-го – 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δKp с периодом $\sim 4,5$ года, при этом локальный минимум амплитуды δKp регистрируется вблизи максимума активности.

Ключевые слова: солнечные пятна, Kp -индекс геомагнитной активности, квазипериодические вариации солнечной и геомагнитной активности.

Введение

В работе проведен анализ временной структуры амплитуды вариаций числа солнечных пятен (SSN) и величин Kp -индекса геомагнитной активности в частотном диапазоне $\sim 1.0E-3 - 4.5E-3$ 1/сут. (периоды $\sim 0,6 - 2,7$ гг.) для 1932 – 2018 гг. Вариации для периодов $\sim 0,6 - 4$ гг. в литературе обычно называют квазипериодическими двухлетними вариациями (quasi-biennial oscillation – QBO). Эти вариации отражают основные базисные процессы развития солнечной активности, возникновение и развитие магнитного поля Солнца. Открытые магнитные потоки, солнечный ветер передают солнечные QBO в гелиосферу. Квазипериодические вариации QBO регистрируются в динамике солнечных параметров (в величинах числа и площади солнечных пятен, в потоках электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах), и как отклик на солнечные QBO регистрируются в динамике параметров солнечного ветра (СВ) и в динамике индексов геомагнитной активности. Уровень геомагнитной активности, определяемый

по величине геомагнитных индексов, во многом определяет параметры солнечного ветра (магнитное поле, скорость, плотность, температуру). Для выделения квазипериодических вариаций используется целый ряд математических методов: дискретное и быстрое Фурье-преобразование, вейвлет-анализ, метод максимальной энтропии, частотная фильтрация данных и др. Спектральный анализ долговременных вариаций амплитуды QBO показал существование целого ряда фундаментальных периодов, характерных для динамики как солнечных, так и гелиосферных QBO. На рис. 1 показаны суммарные за выделенные периоды времени спектры мощности вариаций (вейвлет-спектр, о. е.) для числа солнечных пятен Rz (период 1873 – 2000 гг.), для параметров СВ (скорости v , плотности n , межпланетного магнитного поля – модуля $|B|$ и B_y и B_z компонент поля, период 1964 – 2000 гг.) и для Ap -индекса (период 1932 – 2000 гг.) [1]. Результаты показывают близкое подобие общей картины динамики амплитуды спектров мощности всех параметров – постепенное увеличение мощности при увеличении периода вариаций и

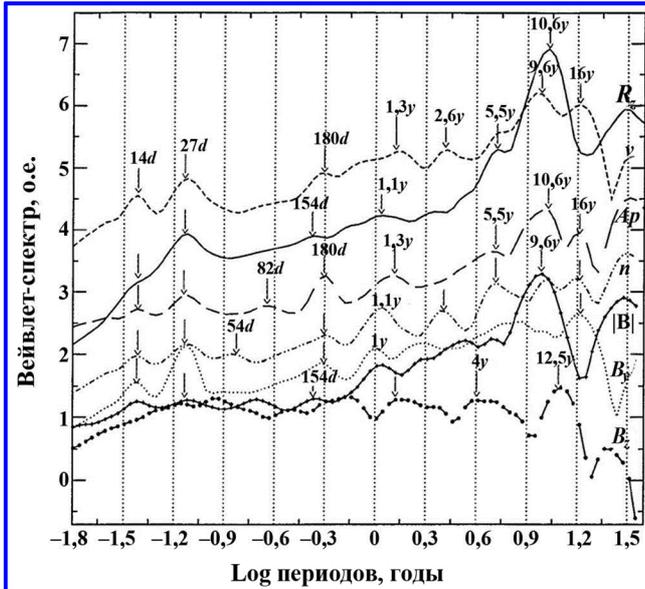


Рис. 1. Спектры мощности вариаций для числа солнечных пятен R_z (период 1873 – 2000 гг.), для параметров СВ (скорости v , плотности n , межпланетного магнитного поля – модуля $|B|$ и B_y - и B_z - компонент поля, период 1964 – 2000 гг.) и для A_p -индекса (период 1932 – 2000 гг.)

наличие пиковых величин мощности для ряда выделенных периодов. Наиболее заметные возрастания спектральной мощности для всех параметров регистрируются вблизи периодов 14 сут, 27 сут, 154 – 180 сут, 1,1 – 1,3 гг., 2,6 г., 5,5 г., 9,6 – 10,6 гг., максимальная мощность регистрируется вблизи

максимумов солнечных циклов. На рис. 1 эти периоды отмечены стрелками и указаны соответствующие значения. Следует отметить, что амплитудные распределения спектров мощности вариаций для солнечных и гелиосферных параметров значительно отличаются. Анализ периодических структур (вейвлет-метод) в вариациях SSN и в динамике aa -индекса геомагнитной активности проведен в работе [2]. В работе исследуются динамические характеристики спектров мощности вариаций для годовых (период 1700 – 2009 гг.), среднемесячных (период 1749 – 2009 гг.) и среднесуточных (1849 – 2009 гг.) величин SSN и для годовых, среднемесячных и среднесуточных (период 1868 – 2009 гг.) величин aa -индекса. Значительные возрастания спектральной мощности регистрируются для периодов 27,8 сут, 157 сут, 370 сут и 2,2 г., 5,5 г., 11 г., 22,7 г., 38,6 г. в вариациях SSN и для периодов 13,8 сут, 26,6 сут, 185 сут и 5,3 г., 11 г., 30 г., 46 г. в вариациях aa -индекса. Максимальная мощность зарегистрирована для периода 11 лет, для периодов $<$ или $>$ 11 лет мощности уменьшаются. Выделенные периоды характеризуют среднюю долговременную структуру динамики вариаций (суммарный вейвлет-спектр). Анализ временной динамики спектральных параметров (амплитудных и частотных) спектров мощности показывает нерегулярное возникновение периодических структур, нестационарность амплитудных и частотных вариаций. Спектральный анализ (вейвлет-метод) динамики числа и площади солнечных пятен для 1750 – 2000 гг. проведен в [3].

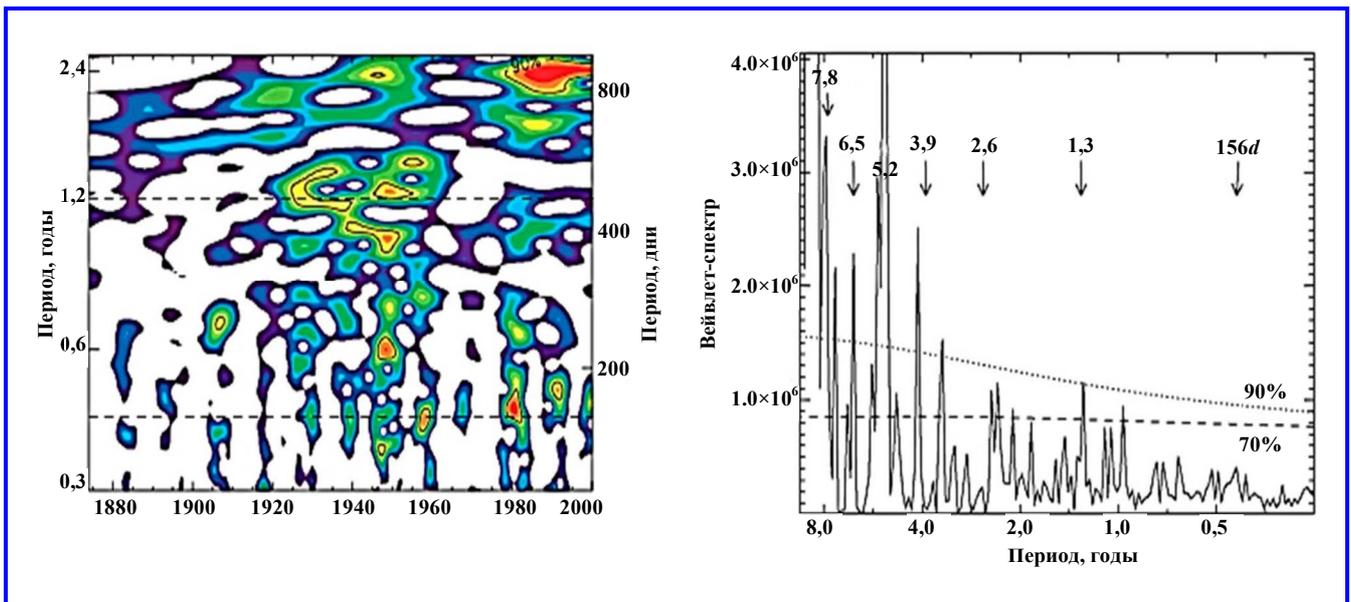


Рис. 2. Временной динамический спектр (вейвлет-спектр) мощности вариаций площади солнечных пятен (а); суммарный вейвлет-спектр для площади солнечных пятен (б)

Временной динамический спектр (вейвлет-спектр) мощности вариаций площади солнечных пятен (1878 – 2000 гг.) для периодов 0,3 – 2,4 гг. представлен на рис. 2, а (периоды 156 дн. и 1,3 г. отмечены горизонтальными штриховыми линиями).

Анализ показывает значительные временные вариации (отсутствие периодичности) в частотных и амплитудных параметрах спектров мощности. Общее усиление мощности вариаций наблюдается после 1920 г. (в 20-м цикле солнечной активности), максимальная мощность регистрируется в 18-м цикле, минимальная – в 20-м цикле. На рис. 2, б представлен суммарный вейвлет-спектр для площади солнечных пятен (1878 – 2000 гг.), периоды 156 сут, 1,3 г., 2,6 г., 3,9 г., 5,2 г., 6,5 г. и 7,8 г. отмечены стрелками, показаны уровни 70% (штрихи) и 90% (точки) достоверности результатов. Подробный анализ временной динамики (период 1972 – 2003 гг.) QBO для солнечных параметров (числа солнечных пятен, потоков электромагнитного излучения Солнца, солнечных открытых магнитных потоков отдельно для гелиоширот $>45^\circ$ и $<45^\circ$, потоков солнечных протонов), для параметров солнечного ветра (межпланетного магнитного поля, скорости и плотности СВ), для A_p - и Dst - геомагнитных индексов и для ряда «земных» параметров (динамики стратосферного озона и температуры) проведен в работе [4]. Изучение временной структуры (период 1966 – 2010 гг.) вариаций параметров солнечного ветра (скорости, плотности давления, температуры), межпланетного магнитного поля (B , B_x , B_y , B_z) и вариаций геомагнитных индексов (Dst , AE , A_p и K_p) проведено в [5]. Сравнение вариаций солнечного радиопотока на частоте 2800 МГц (F10.7 см), числа солнечных пятен и потоков галактических космических лучей (ГКЛ) для нейтронных мониторов в 22-м – 24-м солнечных циклах дано в [6]. Спектральный анализ числа солнечных пятен, B_z -компоненты межпланетного магнитного поля и A_p -индекса геомагнитной активности (1965 – 2018 гг.) в связи с вариациями ГКЛ проведен в [7]. Подробный обзор экспериментальных результатов исследования солнечных магнитных QBO представлен в работе [8]. Спектральный анализ показал, что в вариациях солнечных параметров и параметров солнечного ветра, в вариациях потоков ГКЛ и магнитосферных параметров (индексов геомагнитной активности) можно выделить некоторые фундаментальные периоды, периоды QBO. Наиболее характерные вариации регистрируются вблизи периодов: ~27 сут, 156 сут, 370 сут, 0,7 г., 1,1 г., 1,3 г., 1,7 г., 1,9 г., 2,5 г.,

3 – 4 гг. Однако, временные спектральные характеристики (периоды и амплитуды вариаций) для солнечных и гелиосферных параметров значительно отличаются, отражая специфику процессов формирования отдельных параметров. На рис. 3 представлены примеры временной динамики (период 1965 – 2018 гг.) спектров мощности QBO (вейвлет-анализ) для числа солнечных пятен (рис. 3, а), для вариаций A_p -индекса (рис. 3, б) и для вариаций потоков ГКЛ (рис. 3, в). Внизу показана цветовая палитра для спектральной мощности. Справа на рис. 3 показаны суммарные вейвлет-спектры [В].

Общим в структуре QBO для всех параметров является нерегулярное возникновение периодических структур (квазипериодичность, прерывистость возникновения (intermittence in periodicity), переменные (нестационарные) амплитудная и временная шкалы вариаций (стохастичность вариаций). Для таких нерегулярных процессов характерны очень слабые взаимные корреляционные связи. В настоящее время вопросы формирования солнечных и гелиосферных QBO остаются нерешенными.

Нерегулярность каких процессов внутри Солнца формирует временную структуру солнечных QBO (периоды и амплитуды вариаций)? Какие процессы в солнечной короне и гелиосфере формируют динамику QBO потоков солнечного ветра и геомагнитных индексов? Вопрос о корреляционных связях для динамики QBO между отдельными параметрами остается открытым. В работе рассчитаны спектры мощности вариаций SSN и величин K_p -индекса геомагнитной активности для 1932 – 2018 гг. и проведен сравнительный анализ временной структуры амплитуды вариаций числа солнечных пятен (δSSN) и величин K_p -индекса геомагнитной активности (δK_p) для шести выделенных периодов вариаций: 2,36 г. (частота $1.2E-3$ 1/сут.), 1,72 г. ($1.6E-3$ 1/сут), 1,44 г. ($1.9E-3$ 1/сут), 1,09 г. ($2.5E-3$ 1/сут), 0,72 г. ($3.8E-3$ 1/сут), 0,61 г. ($4.5E-3$ 1/сут).

Вариации солнечной и геомагнитной активности 1932 – 2018 гг.

Динамика солнечной и геомагнитной активности в 1932 – 2018 гг. для среднегодовых величин солнечных пятен и K_p -индекса представлена на рис. 4. Отметим некоторые особенности динамики SSN и K_p -индекса, важные для сравнительного анализа динамики амплитуды вариаций δSSN и δK_p [9]. Солнечная активность (динамика числа солнечных пятен в максимуме цикла) постепенно растет с 17-го до 19-го цикла и постепенно спадает между 21-м и 24-м циклами,

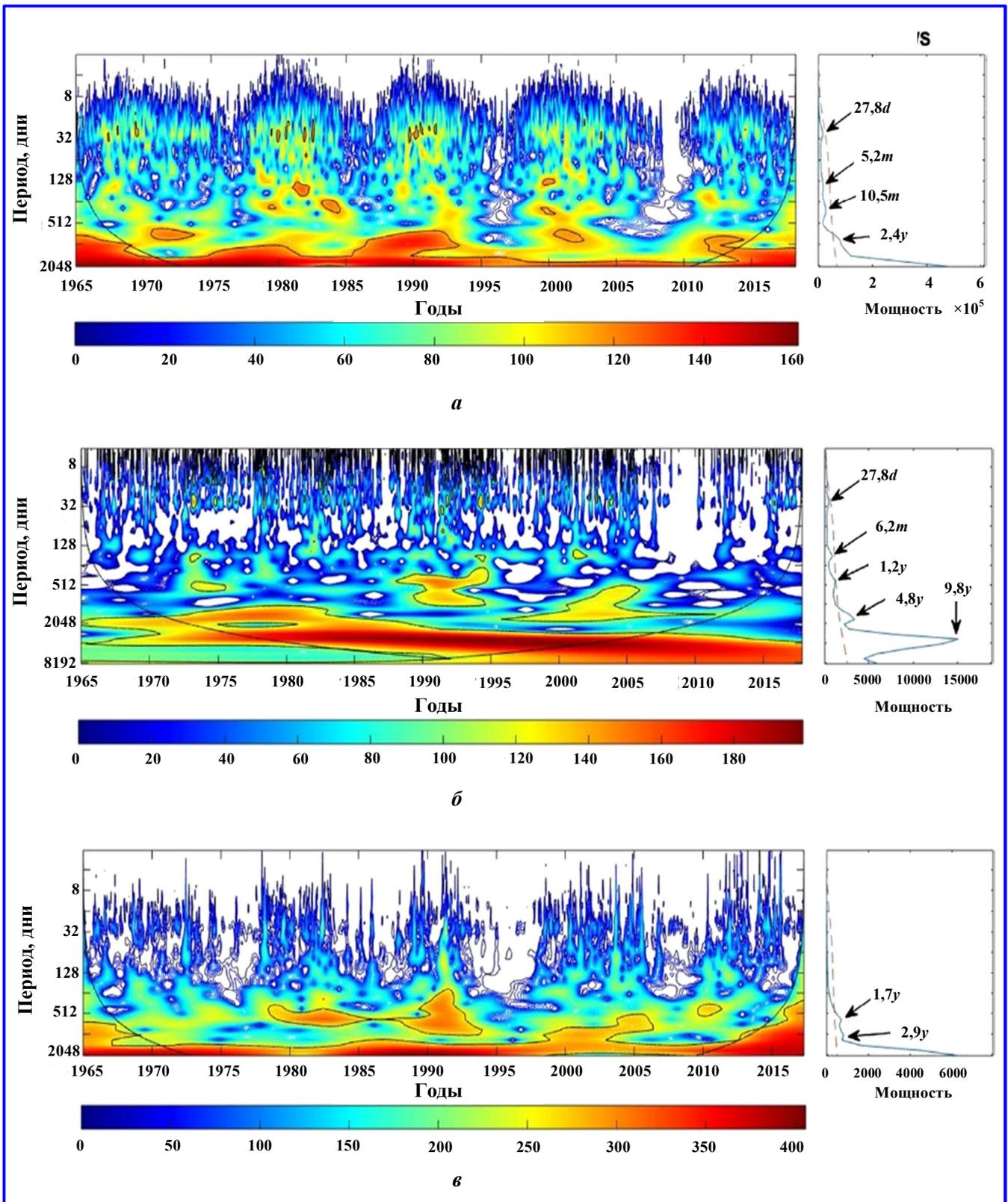


Рис. 3. Временная динамика спектров мощности вариаций: *a* – числа солнечных пятен; *б* – *Ap*-индекса геомагнитной активности; *в* – галактических космических лучей. Справа для каждого параметра и выделенных периодов показана суммарная мощность вариаций за 1965 – 2018 гг. [7]

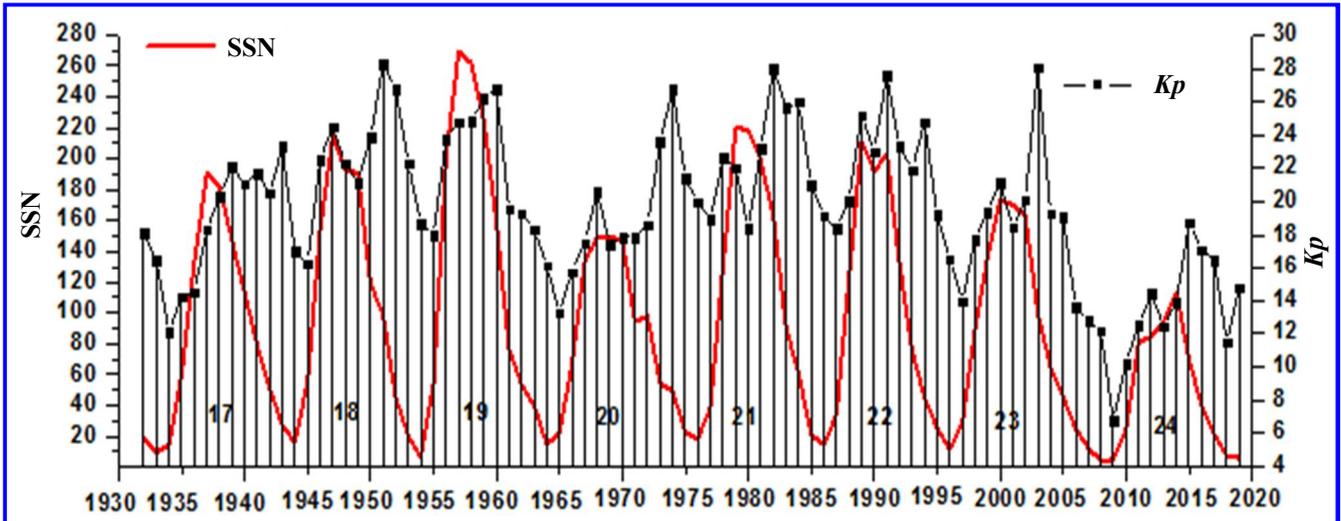


Рис. 4. Среднегодовые величины числа солнечных пятен и среднегодовые среднесуточные значения Kp -индекса за период с 1932 по 2019 гг. (17 – 24-й циклы)

среди семи циклов (17-й – 23-й) в 20-м цикле самое маленькое число солнечных пятен, в 24-м цикле число SSN ~ на 45% меньше среднего числа SSN за семь циклов. Циклы солнечной активности и геомагнитной активности по времени не совпадают. Минимум геомагнитной активности наблюдается в начале очередного цикла на фазе подъема (запаздывание ~1 год), максимум Kp наблюдается через ~4 года после максимума цикла. В среднем максимальная в цикле геомагнитная активность не зависит от числа солнечных пятен в максимуме цикла и от полного числа пятен в цикле. Практически постоянная геомагнитная активность наблюдается с 1938 по 1942 гг. (17-й цикл) и с 1967 по 1972 гг. (20-й цикл), максимальная величина Kp -индекса зарегистрирована в 2003 г. (23-й цикл).

Для выделения частотных характеристик вариаций SSN и Kp -индекса была вычислена спектральная плотность мощности суточных величин SSN и среднесуточных значений Kp -индекса для 1932 – 2018 гг. (рис. 5). В частотных характеристиках вариаций спектральной мощности можно выделить ряд возрастных мощностей, регистрируемых на близких для обоих параметров частотах. На рис. 5 эти частоты пронумерованы и выделены красным цветом, в верхней части рис. 5 указаны соответствующие частоты и периоды. Значительное усиление спектральной мощности для Kp -индекса на частоте $5.5E-3$ 1/сут (период 0,5 г.) связано с годовой динамикой ориентации магнитного диполя Земли относительно гелиосферной топологии, что приводит к появлению полугодовых (сезонных) вариаций геомагнитной активности. Сравнительный анализ временной структуры вариаций числа солнечных пятен (δSSN) и величин Kp -индекса (δKp) был проведен для шести выделенных

периодов вариаций: 2,36 г. (частота $1.2E-3$ 1/сут), 1,71 г. ($1.6E-3$ 1/сут), 1,44 г. ($1.9E-3$ 1/сут), 1,09 г. ($2.5E-3$ 1/сут), 0,72 г. ($3.8E-3$ 1/сут), 0,61 г. ($4.5E-3$ 1/сут). Результаты представлены на рис. 6 – 13.

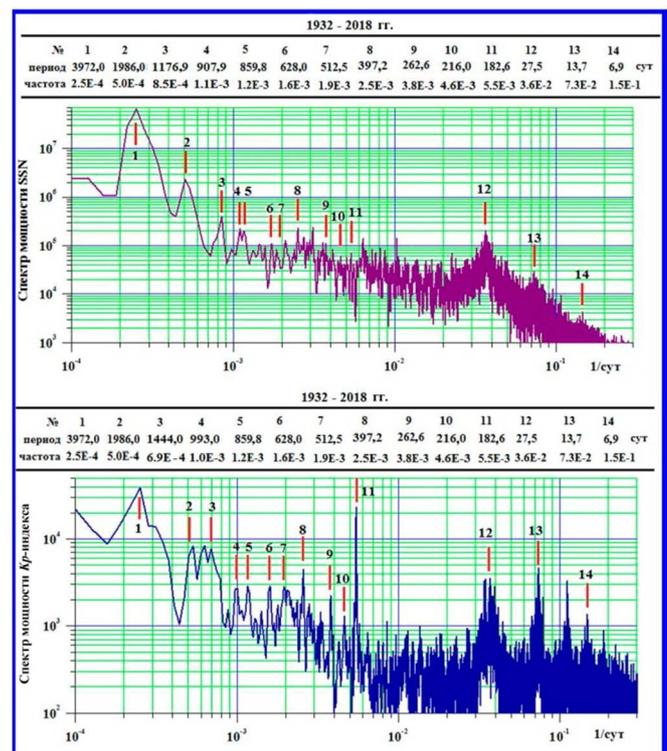


Рис. 5. Спектральная плотность мощности среднесуточных величин числа солнечных пятен и Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Красным выделены возрастные мощности, зарегистрированные на близких для SSN и Kp -индекса частотах. Эти частоты пронумерованы, в верхней части рисунка указаны соответствующие частоты и периоды

Анализ динамики амплитуды вариаций числа солнечных пятен величин Kp -индекса

Для выделения динамических характеристик амплитуды вариаций на определенной частоте мы применили несколько частотных фильтров. Обычно для каждой частоты данные фильтровались несколькими фильтрами (в зависимости от частоты от двух до пяти фильтров) с разной шириной полосы пропускания и с ~95% эффективностью для выделенной частоты. Для выделения структуры временной динамики амплитуды вариаций в работе для каждой частотной области рассматривается динамика локальных максимумов и минимумов δSSN и δKp .

На рис. 6 – 13 для шести выделенных частот представлена временная динамика амплитуды вариаций δSSN и δKp и указана полоса пропускания фильтра. Огибающая амплитуды вариаций показана красным цветом.

Частота $1.2E-3$ 1/сут (период ~2,36 г.)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 2,36 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN . В 18-м, 20-м – 23-м солнечных циклах амплитуда δSSN достигает максимума вблизи максимума числа солнечных пятен и уменьшается на фазе спада активности. Максимальная амплитуда δSSN фиксируется в 1988 – 1990 гг. (максимум 22-го цикла).

В течение восьми солнечных циклов временная динамика локальных максимумов и минимумов δSSN имеет достаточно регулярный характер: регистрируется значительная ~11 лет модуляция амплитуды вариаций и более слабая модуляция ~22 лет. Амплитуды вариаций δKp не зависят от величины Kp -индекса. В 19-м, 22-м и 23-м солнечных циклах локальные максимумы амплитуды δKp регистрируются в периоды максимальной геомагнитной активности: в 1960 г., 1992 г. и в 2003 г. Максимальная амплитуда δKp зарегистрирована в 2003 г.

Частота $1.6E-3$ 1/сут (период ~1,7 г.)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 1,7 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN . Во временной динамике амплитуды локальных максимумов и минимумов δSSN регистрируются некоторые квазипериодические вариации с периодами в среднем ~14 лет, для максимумов амплитуды – с периодом ~16 лет, для минимумов – с периодом ~12,6 г. На данной частоте нет прямой связи динамики амплитуды δSSN с динамикой числа солнечных пятен в циклах. В 17-м, 20-м и 23-м циклах максимальные

амплитуды δSSN регистрируются вблизи максимумов активности, в 18-м, 19-м и 21-м циклах вблизи максимумов циклов регистрируются минимальные амплитуды δSSN . Амплитуды δKp не зависят от величины Kp -индекса.

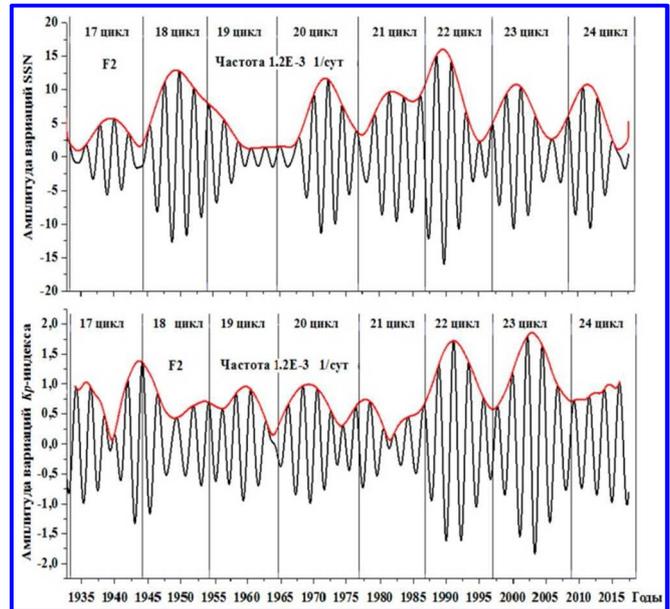


Рис. 6. Амплитуда вариаций на частоте $1.2E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен SSN и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $1.0E-3$ – $1.4E-3$ 1/сут

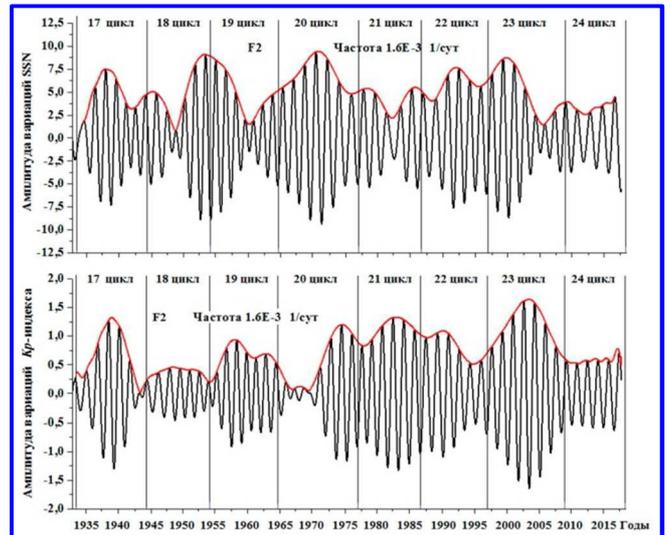


Рис. 7. Амплитуда вариаций на частоте $1.6E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $1.4E-3$ – $1.8E-3$ 1/сут

Во временной динамике локальных максимумов и минимумов амплитуды δKp регистрируются некоторые квазипериодические вариации с периодами в среднем ~ 14 лет, для максимумов амплитуды – с периодом ~ 12 лет, для минимумов – с периодом ~ 16 лет. Временная структура амплитуды δKp внутри цикла частично повторяет динамику среднегодовых величин Kp -индекса. Локальные минимумы амплитуды δKp для 17-го – 23-го циклов регистрируются \sim через 1 – 2 года после минимумов солнечной активности. В течение ~ 7 лет (1965 – 1972 г.) в 20-м цикле регистрируются минимальные амплитуды вариаций δKp . Максимальная амплитуда δKp зарегистрирована в 2003 г. (23-й цикл).

Частота $1.9E-3$ 1/сут (период $\sim 1,4$ года)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 1,4 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN . Во временной динамике амплитуды локальных максимумов и минимумов δSSN регистрируются некоторые квазипериодические вариации с периодами в среднем $\sim 11,8$ г., для максимумов амплитуды – с периодом $\sim 10,4$ г., для минимумов – с периодом $\sim 13,2$ г., регистрируются также вариации с периодами ~ 22 г. и ~ 29 г. (два периода). На данной частоте нет прямой связи динамики амплитуды δSSN с динамикой числа солнечных пятен в циклах. В 17-м, 19-м и 23-м циклах локальные максимумы амплитуды δSSN регистрируются вблизи максимумов солнечных циклов, в 18-м, 21-м и 22-м циклах на фазе спада солнечной активности через ~ 3 года после максимума. Локальные минимумы амплитуды δSSN регистрируются вблизи минимумов 18-го, 20-го и 22-го циклов. Амплитуды вариаций δKp не зависят от величины Kp -индекса. В течение 17-го – 23-го циклов регистрируются достаточно хаотические вариации амплитуды δKp (возможны слабые квазипериодические вариации с периодом ~ 14 г.). Максимальная амплитуда δKp зарегистрирована в 1992 г. (22-й цикл).

Частота $2.5E-3$ 1/сут (период 1,09 г.)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 1,06 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN .

Амплитуды δKp не зависят от величины Kp -индекса. Временная динамика локальных максимумов и минимумов амплитуды вариаций δSSN и δKp показывает ~ 11 -летние циклические вариации. Внутри циклов динамика амплитуды δSSN и δKp не связана с динамикой SSN и Kp .

Минимальные величины δSSN регистрируются вблизи минимумов солнечных циклов. Внутри солнечных циклов регистрируется два максимума интенсивности амплитуды для δSSN (18-й – 21-й циклы) и для δKp (17-й – 23-й циклы): один – вблизи максимума активности, другой – через $\sim 2 - 3$ г., – в промежутке между ними амплитуды вариаций значительно снижаются. Такие разделенные максимумы вариаций для δSSN вероятно отражают эффект Гневешева для вариаций числа солнечных пятен вблизи максимумов солнечной активности [10 – 13].

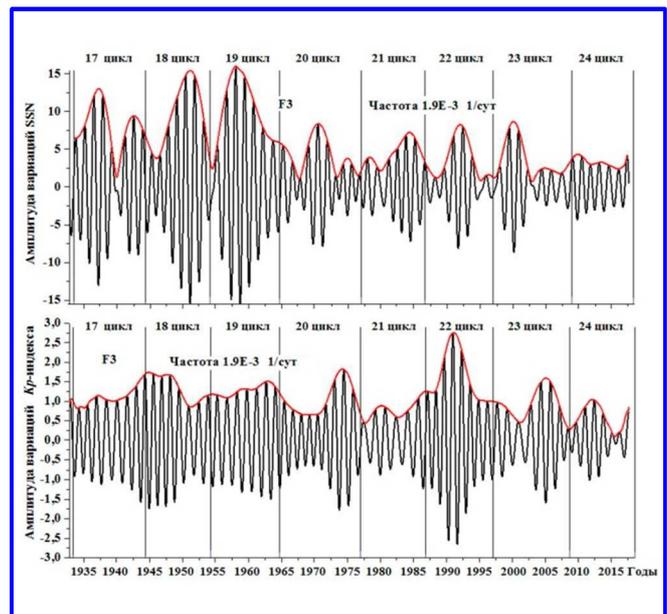


Рис. 8. Амплитуда вариаций на частоте $1.9E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $1.6E-3 - 2.1E-3$ 1/сут

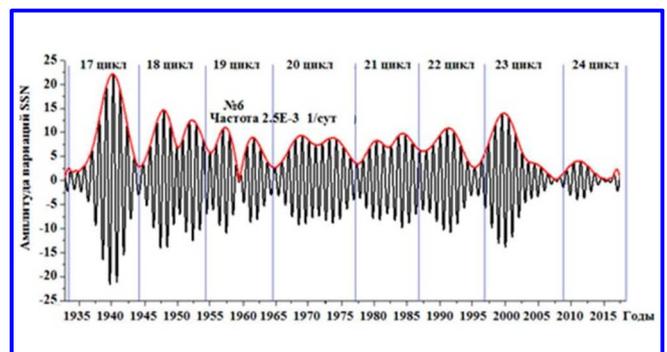


Рис. 9. Амплитуда вариаций на частоте $2.5E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен SSN и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $2.0E-3 - 3.0E-3$ 1/сут

Частота $3.8E-3$ 1/сут (период 0,72 г.)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 0,72 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN . Временная динамика локальных минимумов и максимумов амплитуды δSSN показывает циклические вариации с периодом ~ 11 лет, можно выделить слабые вариации амплитуды с периодами ~ 22 и ~ 32 гг. (два периода). Локальные минимумы амплитуды δSSN зарегистрированы вблизи минимумов солнечных циклов, максимальная амплитуда – вблизи максимума 18-го цикла солнечной активности (1947 г.). В структуре δSSN внутри 17-го, 19-го, 21-го, 22-го и 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δSSN : первый – вблизи максимума цикла, второй – через $\sim 4,2$ г. Амплитуды δKp не зависят от величины Kp -индекса. Временная динамика локальных минимумов и максимумов амплитуды δKp показывает нерегулярные вариации $\sim 10, 22$ и 31 гг. (один период). Максимальная амплитуда δKp зарегистрирована в 23-м цикле. В структуре амплитуды δKp внутри 17-го – 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δKp с периодом $\sim 4,5$ г., при этом локальный минимум амплитуды δKp регистрируется вблизи максимума активности.

Частота $4.5E-3$ 1/сут (период 0,61 г.)

Отметим наиболее значительные особенности временной динамики δSSN и δKp с периодом 0,61 г. Амплитуды δSSN не зависят от SSN . Временная динамика локальных минимумов и максимумов амплитуды δSSN показывает квазипериодические вариации с периодами $\sim 10 - 13$ лет. Максимальные амплитуды δSSN зарегистрированы \sim в 1950, 1981 гг. (вблизи максимумов 18-го и 21-го циклов) и в ~ 2010 г. (минимум 23-го цикла), в среднем с периодом ~ 30 лет. Внутри цикла, как правило, амплитуды δSSN увеличиваются при увеличении активности, достигают максимума вблизи максимума цикла и далее постепенно уменьшаются.

Следует отметить, в 17-м, 19-м, 20-м и 22-м циклах внутри циклов регистрируются два максимума амплитуды δSSN : первый – вблизи максимума цикла, второй – через ~ 3 года (возможен эффект Гневешева в амплитуде вариаций). Амплитуды δKp не зависят от величины Kp -индекса. Временная динамика локальных минимумов и максимумов амплитуды δKp показывает нерегулярные вариации с периодом ~ 11 и ~ 21 гг. Локальные максимумы амплитуды δKp регистрируются в периоды максимальной геомагнитной активности, в среднем через $\sim 3,6$ г. после макси-

мумов активности 17-го, 19-го – 23-го солнечных циклов. В 20-м цикле зарегистрировано два максимума амплитуды δKp , по времени совпадающие с двумя максимумами амплитуды δSSN (возможно отклик на эффект Гневешева в δSSN).

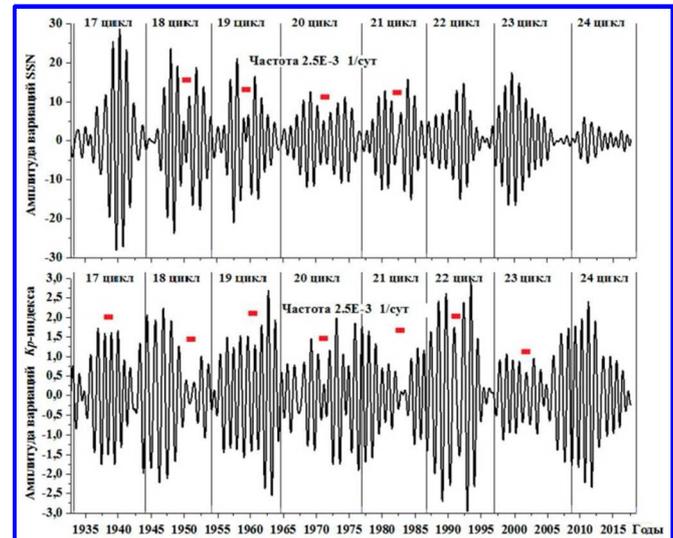


Рис. 10. Амплитуда вариаций на частоте $2.5E-3$ 1/сут, среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $1.3E-3 - 3.1E-3$ 1/сут. Красным отмечены периоды регистрации двойных максимумов вариаций δSSN и δKp вблизи максимумов солнечных циклов

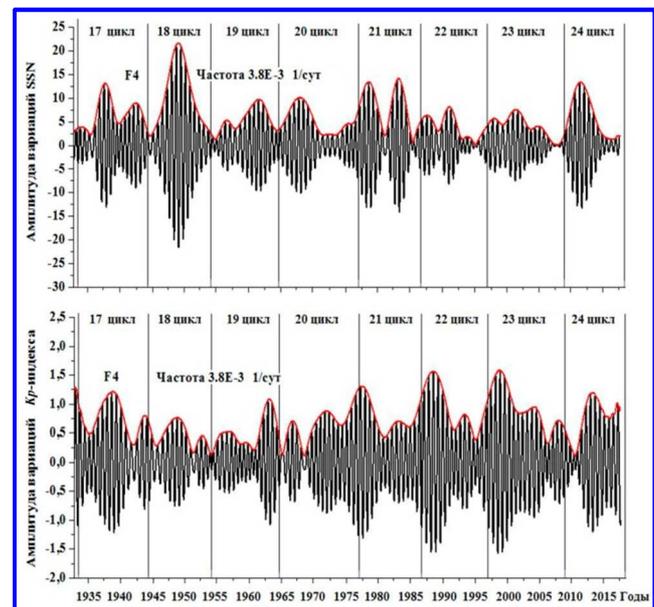


Рис. 11. Амплитуда вариаций на частоте $3.8E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $2.3E-3 - 5.1E-3$ 1/сут

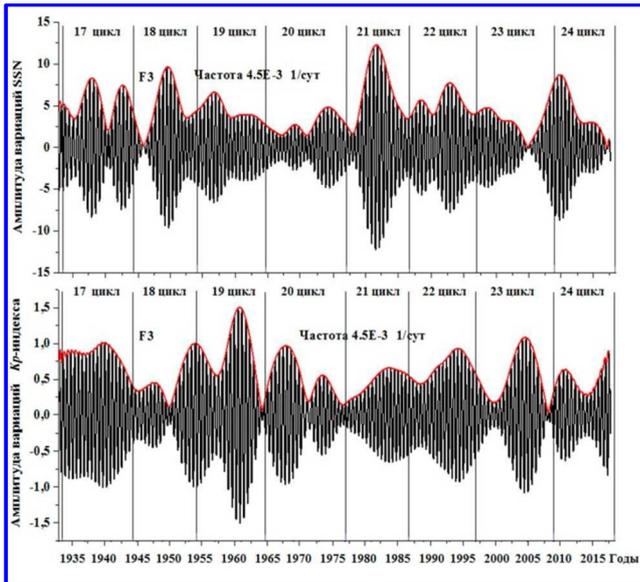


Рис. 12. Амплитуда вариаций на частоте $4.5E-3$ 1/сут среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности для периода 1932 – 2018 гг. Полоса пропускания фильтра $3.2E-3$ – $5.8E-3$ 1/сут

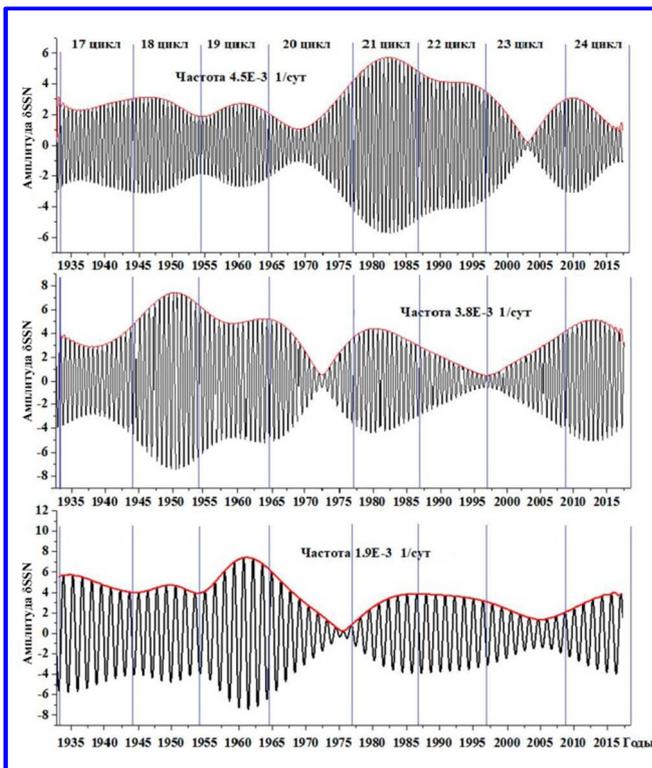


Рис. 13. Амплитуда вариаций среднесуточных величин числа солнечных пятен и величин Kp -индекса геомагнитной активности (период 1932 – 2018 гг.) для частоты $3.8E-3$ 1/сут (полоса пропускания фильтра $3.6E-3$ – $4.0E-3$ 1/сут) и для частоты $1.9E-3$ 1/сут (полоса пропускания фильтра $1.7E-3$ – $2.1E-3$ 1/сут)

Анализ временной структуры δSSN и δKp за восемь солнечных циклов показывает, что после 20-го цикла для всех периодов значительно меняется общая (амплитудная и частотная) структура временной динамики δSSN и δKp . Для примера на рис. 13 для трех периодов вариаций ($\sim 0,6$ г., $0,7$ г. и $1,4$ г.) показана временная структура δSSN , полученная с использованием фильтров с узкой полосой пропускания. После ~ 1970 г. (20-й цикл) для периодов $1,4$ г. и $0,7$ г. амплитуды δSSN значительно уменьшаются. Локальные минимумы вариаций амплитуды для периодов $1,7$ г. и $0,7$ г. регистрируются \sim через 26 лет. После ~ 1970 г. изменяется и структура δKp : амплитуды вариаций для периодов $1,7$ г. (рис. 7) и $0,7$ г. (рис. 11) увеличиваются. Вероятно, этот эффект связан с общей динамикой солнечной активности: рост солнечной активности от 17-го до 19-го циклов и спад после 20-го солнечного цикла (рис. 1).

Основные результаты

В работе проведен анализ временной динамики локальных максимумов и минимумов амплитуды вариаций числа солнечных пятен и величин Kp -индекса в частотном диапазоне $\sim 1.2E-3$ – $4.5E-3$ 1/сут (периоды $\sim 2,3$ – $0,6$ гг.) для 1932 – 2018 гг. Получены следующие результаты.

1. Амплитуды вариаций числа солнечных пятен δSSN и δKp не зависят от SSN и Kp -индекса. Динамика амплитуды δSSN и δKp (как долговременная, так и внутри цикла солнечной активности) не зависит от динамики SSN и Kp -индекса.

2. Временная динамика локальных максимумов и минимумов амплитуды δSSN и δKp имеет достаточно сложную структуру. Периодические вариации ~ 11 лет можно выделить в вариациях амплитуды δSSN для периодов $2,3$ г., $1,09$ г. и $0,7$ г. При этом, как правило, внутри цикла динамика δSSN не связана с динамикой числа SSN . Квазипериодические δSSN можно выделить для периода $1,7$ г. (вариации ~ 12 – 16 гг.), для периода $1,4$ г. (вариации ~ 10 – 13 лет) и для периода $0,6$ г. (вариации ~ 10 – 13 лет). В течение 17-го – 24-го циклов временная динамика локальных минимумов и максимумов амплитуды δKp показывает нерегулярные вариации с периодами ~ 11 лет и ~ 21 г. Для периода $1,7$ г. можно выделить слабые квазипериодические вариации с периодами ~ 12 – 16 лет. Для периода $2,3$ г. локальные максимумы амплитуды δKp регистрируются в периоды максимальной геомагнитной активности, временная структура амплитуды δKp внутри цикла частично повторяет динамику среднегодовых величин Kp -индекса.

3. Эффект Гневышева (Gnevyshev Gap) зарегистрирован в динамике амплитуды δSSN (18-й – 21-й циклы) для частоты $2.5\text{E}-3$ 1/сут и частоты $4.5\text{E}-3$ 1/сут. Внутри солнечных циклов регистрируется два максимума амплитуды: один – вблизи максимума активности, другой – через $\sim 2 - 3$ года, – в промежутке между ними амплитуды вариаций значительно снижаются. Подобная динамика для этих частот зарегистрирована и в динамике амплитуды вариаций δKp в 17-м – 23-м циклах, эти вариации в δKp и δSSN регистрируются одновременно.

4. В динамике амплитуды δSSN для частоты $3.8\text{E}-3$ 1/сут внутри 17-го, 19-го, 21-го – 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δSSN : первый – вблизи максимума цикла, второй – через $\sim 4,2$ года. В структуре амплитуды δKp внутри 17-го – 23-го циклов регистрируются два локальных максимума амплитуды δKp с периодом $\sim 4,5$ года, при этом локальный минимум амплитуды δKp регистрируется вблизи максимума активности.

5. Изменения крупномасштабной временной структуры δSSN и δKp после 20-го солнечного цикла отражают изменения общей динамикой солнечной активности, рост солнечной активности от 17-го до 19-го циклов и спад после 20-го солнечного цикла.

Литература

1. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters / S. R. Prabhakaran Nayar, V. N. Radhika, K. Revathy [et al.] // Solar Physics. – 2002. – Vol. 208. – P. 359 – 373. – DOI : 10.1023/A:1020565831926. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/1prabhakaranaynar2002.pdf>. (дата обращения: 15.04.2020).
2. Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity : wavelet analysis / Y. P. Singh, Badruddin // Planetary and Space Science. – 2014. – Vol. 96. – P. 120 – 124. – DOI : 10.1016/j.pss.2014.03.019. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/2singh2014.pdf>. (дата обращения: 15.04.2020).
3. The 1,3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin / A. Krivova, S. K. Solanki // Astronomy & Astrophysics. – 2002. – Vol. 394. – P. 701 – 706. – DOI : 10.1051/0004-6361:20021063. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/3krivova2002.pdf>. (дата обращения: 15.04.2020).
4. Differences in the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics of the solar, interplanetary, and terrestrial parameters / R. P. Kane // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110. – P. A01108. – DOI : 10.1029/2004JA010606. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/4kane2005.pdf>. (дата обращения: 15.04.2020).

5. Wavelet Analysis on Solar Wind Parameters and Geomagnetic Indices / C. Katsavrias, P. Preka-Papadema, X. Moussas // Solar Physics. – 2012. – DOI : 10.1007/s11207-012-0078-6. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/5katsavrias2012.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

6. Periodicity Variation of Solar Activity and Cosmic Rays During Solar Cycles 22 – 24 / Prithvi Raj Singh, C. M. Tiwari, S. L. Agrawal [et al.] // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 118. – DOI : 10.1007/s11207-019-1511-x. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/6singh2019.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

7. Spectral Analysis of Solar and Geomagnetic Parameters in Relation to Cosmic-ray Intensity for the Time Period 1965 – 2018 / M. Tschla, H. Gerontidou, M. Mavromichalaki // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 15. – DOI : 10.1007/s11207-019-1403-0. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/7tschla2019.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

8. Combined Analysis of the Observational Aspects of the Quasi-biennial Oscillation in Solar Magnetic Activity / G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth [et al.] // Space Science Reviews December. – 2014. – Vol. 186. – Iss. 1 – 4. – P. 359 – 386. – DOI : 10.1007/s11214-014-0068-0. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/8bazilevskaya2014.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

9. Динамика солнечной и геомагнитной активности. II. Периодические вариации солнечной и геомагнитной активности / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2019. – Т. 171. – № 4. – С. 24 – 38. – URL : <http://jurnal.vniiem.ru/text/171/24-38.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

10. Essential features of the 11-year solar cycle / M. N. Gnevyshev // Solar Physics. – 1977. – Vol. 51. – Issue 1. – P. 175 – 183. – DOI : 10.1007/BF00240455. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/10gnevyshev1977.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

11. A Model of the Double Magnetic Cycle of the Sun / E. E. Benevolenskaya // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 509. – Issue 1. – P. L49 – L52. – DOI : 10.1086/311755. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/11benevolenskaya1998.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

12. Structure of the maximum phase of solar cycles 21 and 22 / G. A. Bazilevskaya, M. B. Krainev, V. S. Makhmutov [et al.] // Solar Physics. – 2000. – Vol. 197. – P. 157 – 174. – DOI : 10.1023/A:1026515520311. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/12bazilevskaya2000.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

13. One possible reason for double-peaked maxima in solar cycles: is a second maximum of solar cycle 24 expected? / A. Kilcik, A. Ozguc // Solar Physics. – 2014. – Vol. 289. – P. 1379 – 1386. – DOI : 10.1007/s11207-013-0407-4. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/13kilkic2013.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

Поступила в редакцию 21.04.2020

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)
(ИКИ РАН).

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

DYNAMICS OF LOW-FREQUENCY VARIATIONS IN THE NUMBER OF SUNSPOTS AND K_p OF THE INDEX OF GEOMAGNETIC ACTIVITY FOR 8 CYCLES OF SOLAR ACTIVITY (1932 – 2018)

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

The temporal structure of variations in solar activity reflects the total effect of a number of processes of the appearance and development of the solar magnetic field. These processes form the basic characteristics of the dynamics of solar activity, in particular, solar cycles and the internal structure of solar cycles. The physical mechanisms governing the dynamics of solar activity are not well understood. A characteristic feature of the dynamics of solar activity is the presence of quasiperiodic variations in the structure of variations of the main parameters (the number of sunspots, magnetic field, electromagnetic radiation in various spectral ranges). Common in the structure of variations for all parameters is the irregular occurrence of periodic structures, variable amplitude and time scales of variations. As a response to variations in solar parameters, quasiperiodic variations are recorded in the dynamics of geomagnetic activity indices. At present, it is believed that quasiperiodic variations with periods of ~ 1 yr – 11 yr in the structure of solar parameters reflect the dynamics of the development of two different dynamo processes that determine the formation of the magnetic field of the Sun and, consequently, the dynamics of solar activity. The paper analyzes the temporal structure of the amplitude of variations in the number of sunspots SSN and values of K_p of the index of geomagnetic activity in the frequency range $\sim 1.0E-3$ – $4.5E-3$ 1 / day. (periods $\sim 0,6$ – 2,7 yr) for 1932 – 2018. The dynamics of the variations of the local maxima and minima of the number of SSNs and the variations of the local maxima and minima of the values of the K_p -index with the dynamics of the absolute values of the corresponding parameters are compared. The dynamics of the amplitude of variations of δSSN and δK_p (both long-term and within the cycle) does not depend on the dynamics of the number of solar SSNs and the dynamics of the K_p -index. In the variations in the amplitude δSSN for periods of 2,3 yr, 1,09 yr and 0,7 yr, periodic variations of ~ 11 yr are distinguished, for a period of 1,7 yr – weak quasiperiodic variations of ~ 12 – 16 yr. The Gnevyshev Gap effect was recorded in the dynamics of the amplitude of variations δSSN (18 – 21 cycles) for a frequency of $2.5E-3$ 1 / day and a frequency of $4.5E-3$ 1 / day. Inside the solar cycles, two amplitude maxima are recorded, one near the activity maximum, the other \sim after 2 – 3 years, in the interval between them the amplitudes of the variations are significantly reduced. A similar dynamics for these frequencies was also recorded in the dynamics of the amplitude of variations of δK_p in 17 – 23 cycles; these variations in δK_p and δSSN are recorded simultaneously. In the dynamics of the amplitude of variations of δSSN for a frequency of $3.8E-3$ 1 / day, two local maximums of the amplitude δSSN are recorded within 17, 19, 21, 22, and 23 cycles, the first near the maximum of the cycle, the second \sim after 4,2 years. In the structure of the amplitude of variations of δK_p within 17 – 23 cycles, two local maximums of amplitude δK_p are recorded with a period of $\sim 4,5$ years, while the local minimum of amplitude δK_p is recorded near the maximum of activity.

Key words: sunspots, K_p -index of geomagnetic activity, quasiperiodic variations of solar and geomagnetic activity.

References

1. Wavelet analysis of solar, solar wind and geomagnetic parameters / S. R. Prabhakaran Nayar, V. N. Radhika, K. Revathy [et al.] // Solar Physics. – 2002. – Vol. 208. – P. 359 – 373. – DOI : 10.1023/A:1020565831926. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/1prabhakaranaynar2002.pdf>.
2. Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity : wavelet analysis / Y. P. Singh, Badruddin // Planetary and Space Science. – 2014. – Vol. 96. – P. 120 – 124. – DOI : 10.1016/j.pss.2014.03.019. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/2singh2014.pdf>.
3. The 1,3-year and 156-day periodicities in sunspot data: Wavelet analysis suggests a common origin / A. Krivova, S. K. Solanki // Astronomy & Astrophysics. – 2002. – Vol. 394. – P. 701 – 706. – DOI : 10.1051/0004-6361:20021063. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/3krivova2002.pdf>.
4. Differences in the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics of the solar, interplanetary, and terrestrial parameters / R. P. Kane // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110. – P. A01108. – DOI : 10.1029/2004JA010606. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/4kane2005.pdf>.
5. Wavelet Analysis on Solar Wind Parameters and Geomagnetic Indices / C. Katsavrias, P. Preka-Papadema, X. Moussas // Solar Physics. – 2012. – DOI : 10.1007/s11207-012-0078-6. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/5katsavrias2012.pdf>.
6. Periodicity Variation of Solar Activity and Cosmic Rays During Solar Cycles 22 – 24 / Prithvi Raj Singh, C. M. Tiwari, S. L. Agrawal [et al.] // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 118. – DOI : 10.1007/s11207-019-1511-x. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/6singh2019.pdf>.

7. Spectral Analysis of Solar and Geomagnetic Parameters in Relation to Cosmic-ray Intensity for the Time Period 1965 – 2018 / M. Tschla, H. Gerontidou, M. Mavromichalaki // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 15. – DOI : 10.1007/s11207-019-1403-0. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/7tsichla2019.pdf>
8. Combined Analysis of the Observational Aspects of the Quasi-biennial Oscillation in Solar Magnetic Activity / G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth [et al.] // Space Science Reviews December. – 2014. – Vol. 186. – Iss. 1 – 4. – P. 359 – 386. – DOI : 10.1007/s11214-014-0068-0. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/8bazilevskaya2014.pdf>
9. Dynamic of Solar and Geomagnetic activity. II. Periodical variations of solar and geomagnetic activities / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2019. – Vol. 171. – № 4. – P. 24 – 38.
10. Essential features of the 11-year solar cycle / M. N. Gnevyshev // Solar Physics. – 1977. – Vol. 51. – Issue 1. – P. 175 – 183. – DOI : 10.1007/BF00240455. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/10gnevyshev1977.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).
11. A Model of the Double Magnetic Cycle of the Sun / E. E. Benevolenskaya // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 509. – Issue 1. – P. L49 – L52. – DOI : 10.1086/311755. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/11benevolenskaya1998.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).
12. Structure of the maximum phase of solar cycles 21 and 22 / G. A. Bazilevskaya, M. B. Kraevnev, V. S. Makhmutov [et al.] // Solar Physics. – 2000. – Vol. 197. – P. 157 – 174. – DOI : 10.1023/A:1026515520311. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/12bazilevskaya2000.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).
13. One possible reason for double-peaked maxima in solar cycles: is a second maximum of solar cycle 24 expected? / A. Kilcik, A. Ozguc // Solar Physics. – 2014. – Vol. 289. – P. 1379 – 1386. – DOI : 10.1007/s11207-013-0407-4. – URL : <http://cosmophysics.ru/19/05/13kilcik2013.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).

*Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.*

*IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).
(JC «VNIIEEM 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.*

*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.*

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.*

(JC «VNIIEEM Corporation»).