

ДОЛГОЖИВУЩИЕ АКТИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА И АКТИВНОСТЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТИПА Pc3

Г. В. КУКЛИН и В. А. ПАРХОМОВ

СибИЗМИРАН, Иркутск, СССР

Abstract: A conformity of the Pc3 type geomagnetic pulsation conditions and of the solar wind parameters, a conformity of the waves, observed in the interplanetary space and of ground observations of pulsations permit to construct an index which is different from the magnetic activity indices (K_p , A_p , Dst) in its physical nature.

In this paper we use Σ APc3 index obtained from regular observations of pulsations in Irkutsk during 1957—1968 years. An application of a special numerical filter detecting the oscillations of 27, 13.5 and 9-day periods simultaneously to the primary time series of Σ APc3 index allowed to follow the changes of variations which are caused by presence of large-scale slow-varying pattern of geoeffective formations on the Sun. It was found out that in years of solar cycle maximum, 29-day variations prevail and in years of minimum 27-day ones.

There are cases as of simultaneous coexistence of geoeffective formations at various development phases and at different longitudes as of their consecutive replacement. The changes of variation periodicities caused by Sun's rotation as far as the solar cycle develops are confirmed by the application of the correloperiodogram analysis and of the principal component expansion.

The comparison of 27-day calendar of Σ APc3 during 1957—1968 with a summary map of calcium flocculi density distribution on the Sun (by P. Ambrož) revealed their likeness in many details that one may consider as an argument in favour of that large velocity streams of the solar wind correlate with the regions of higher calcium flocculi occurrence (in sense of large-scale pattern).

For this result verification the cross-correlation analysis of Σ APc3 and SCA II time series during 1957—1968 was used.

Введение

Результаты сопоставлений режима геомагнитных пульсаций с параметрами околоземного космического пространства показали возможность исследования динамики солнечного ветра и магнитосферы по наземным наблюдениям геомагнитных пульсаций. Общие принципы гидромагнитной диагностики сформулированы в обзорах [1, 2].

Для изучения структуры солнечного ветра наиболее пригодны пульсации Pc3 (период 10—45 сек). Эти пульсации наблюдаются на дневной стороне магнитосферы практически изо дня в день и обнаруживают тесную связь со скоростью солнечного ветра [3, 4], напряженностью [5, 6] и структурой межпланетного магнитного поля [7, 8].

Обоснование конкретных методов диагностики предполагает знание вариаций режима пульсаций с циклом солнечной активности и характер связи источника Pc3 с активными образованиями на поверхности Солнца.

Наличие такой информации позволяет, кро-

ме того, исследовать неоднородную структуру солнечного ветра и ее связь с пространственно-временным распределением солнечной активности.

Однако результаты исследования циклических закономерностей Pc3 противоречивы [9, 10]. Неоднозначны и поиски связи источника пульсаций с активными солнечными образованиями [10]. Данный вопрос тесно связан с проблемой M-областей, поскольку Pc3 составляют тонкую структуру рекуррентных геомагнитных возмущений.

Для решения этой проблемы до сих пор в основном использовался метод Кри и Стэгга (метод наложенных эпох) — наложение вариаций отдельных событий. Данному методу присущ субъективизм, связанный с выбором нуль-дней по определенным критериям и с интерпретацией получаемых кривых — статистически значимый максимум означает физическую корреляцию. Однако прохождением активных областей через ЦМ можно объяснить наличие как минимума, так и максимума, что послужило основой для создания гипотезы

конуса избегания Ван-Аллена [11] и активных областей Э. Р. Мустеля [12]. В противоположность этим гипотезам, Десслер и Феджер [13] и Пиддингтон [14] предполагают источником рекуррентных геофизических явлений взаимодействие быстрых и медленных потоков солнечного ветра [13] и изменение ориентации м.м.п. [14].

Исходным материалом в перечисленных гипотезах являлись индексы магнитной активности. Однако индексы магнитной активности являются интегральными индексами (эффекты кольцевых и ионосферных токов, магнитосферных суббурь) и характеризуют возмущенность магнитосферы в глобальном масштабе. Критика использования индексов магнитной активности для исследования связи геофизических явлений с динамикой солнечного ветра и центрами активности содержится в [3, 15, 16]. В то же время использование Pс3 для исследования солнечного ветра оправдано потому, что наблюдения на КА показали существование волн в этом диапазоне частот в переходной области и в солнечном ветре [16, 17, 18]. Следовательно, пульсации Pс3 приносят к поверхности Земли информацию о солнечном ветре и отражают процесс взаимодействия его с магнитосферой.

Поэтому индекс, сконструированный по наблюдениям Pс3, имеет конкретный физический смысл и не дублирует информацию, получаемую из анализа хорошо отработанных индексов магнитной активности (Kp, Ap, Dst).

Своей целью мы ставили подробно изучить вариации активности Pс3 и активности кальциевых флоккулов с периодами, равными обороту Солнца в течение цикла активности, применяя независимые статистические методы, попытаться исследовать связи вариаций активности Pс3 и Ca II.

В качестве исходного материала использованы индексы $\Sigma APc3$ за период 1957–1968 гг. $SCaII(t)$ за этот же период, а также сводная карта распределения кальциевых флоккулов, построенная П. Амброжем [19].

Индекс $\Sigma APc3$ [3] является безразмерной величиной и получается в результате осреднения характерных амплитуд Pс3 (по наблюдениям на ст. Иркутск) в 15-минутных интервалах каждого часа за 10 дневных часов (8^h–18^h LT) и последующей нормировкой среднесуточного значения к среднегодовому.

Индекс $SCaII(t)$, согласно [20], определяется по формуле:

$$SCaII(t) = \sum_i I_i A_i \cos \left\{ \frac{2\pi (t - t_i)}{27} \right\} \cos L_i,$$

где t – время в днях, t_i – время в днях, когда i – флоккул пересек ЦМ, L_i – широта флоккула, I_i – интенсивность, A_i – площадь.

Анализ диаграмм 27-дневной повторяемости

Для иллюстрации исходного ряда данных на рис. 1 и 2 представлены временные диаграммы индексов $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$ (27-дневные «коврики»). По интенсивности индексы разбиты на 5 градаций, чтобы не усложнять картины.

Анализ рис. 2 и 1 позволяет сделать предварительные заключения о периодичности индексов. 29-дневная периодичность $\Sigma APc3$ прослеживается, в основном, вблизи эпохи минимума цикла.

Рекуррентны повышенные значения индекса в оборотах 1747–1755 (3–8 дни оборота), 1764–1786 (3–7 дни), 1777–1784 (12–16 дни) и 1818–1826 (5–10 дни). Рекуррентность вблизи максимума активности выражена слабо. Можно отметить 27-дневную периодичность в оборотах 1724–1728 (6–10 дни оборота) и в 1840–1844 (3–6 дни).

Аналогичный анализ рис. 2 позволяет проследить отдельные периоды рекуррентности для индекса $SCaII(t)$ в оборотах 1707–1715 (18–27 дни), 1724–1732 (5–14 дни), 1749–1755 (0–6 дни), 1760–1764 (3–6 дни), 1767–1784 (3–6 дни) и 1772–1782 (16–20 дни).

Сопоставление диаграмм рис. 1 и рис. 2 показывает соответствие областей повышенных значений индекса $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$ в отдельные эпохи солнечного цикла. Удовлетворительное соответствие можно отметить на нисходящей ветви цикла (1962–1963 гг.).

В годы вблизи максимума активности области повышенных значений $\Sigma APc3$ располагаются слева от областей повышенных значений индекса $SCaII(t)$. Это формально указывает, что источник, ответственный за повышение активности Pс3, должен располагаться с восточной стороны от области, дающей наибольший вклад в индекс $SCaII(t)$. Встречаются случаи расположения повышенных значений $\Sigma APc3$ справа от повышенных значений $SCaII(t)$ – в оборотах 1750–1754 и 1788–1793. В этих последовательностях источник, ответ-

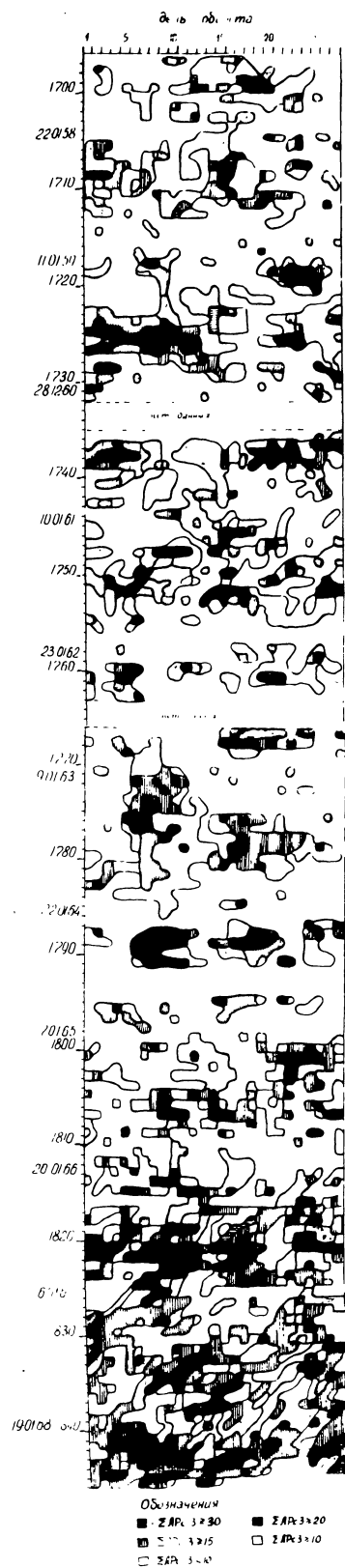


Рис. 1. «Коврик» 27-дневной повторяемости индекса $\Sigma AP_{с3}$.

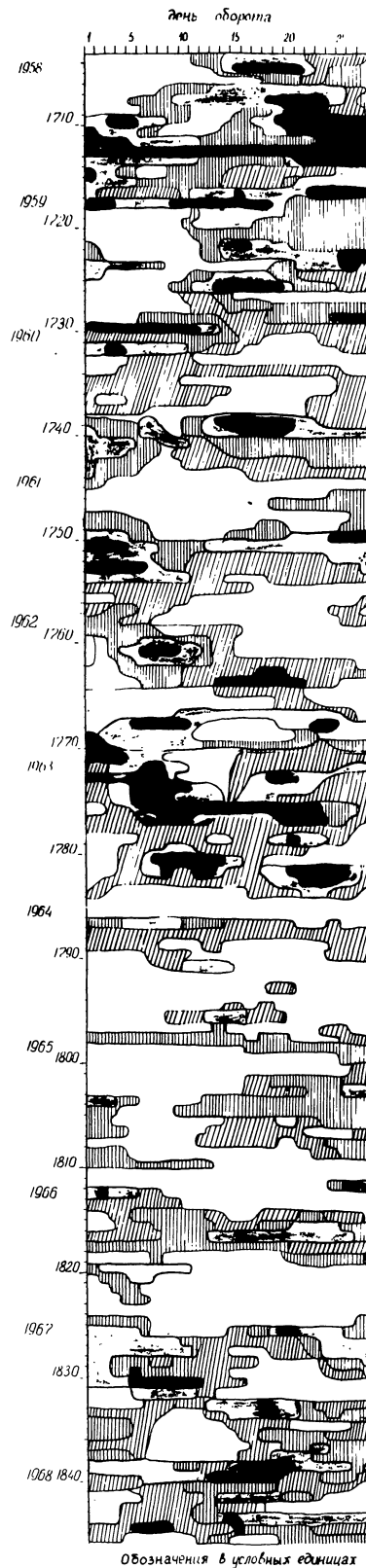


Рис. 2. «Коврик» 27-дневной повторяемости индекса $\Sigma Ca II (t)$ (по данным [20]).

ственный за повышенные индексы $\Sigma APc3$, должен располагаться с западной стороны от активной области, дающей наибольший вклад в индекс $SCaII(t)$.

Проведенный анализ не дает существенно новой качественной информации о взаимосвязи геофизических и солнечных явлений. Аналогичные результаты были получены и в работах [3, 4].

Применение избирательных числовых фильтров

Анализ рис. 1 и 2 показал наличие вариаций с периодом, близким к продолжительности оборота Солнца. Поэтому для обработки исходных рядов данных можно применить избирательные, числовые фильтры, выделяющие колебания в узком частотном диапазоне. Мето-

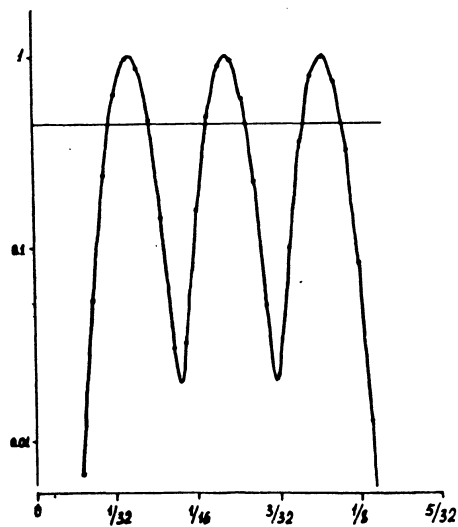


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика числового избирательного фильтра, выделяющего колебания с периодами 27, 13,5 и 9 дней.

дика конструирования и применения таких фильтров подробно излагается в [21, 22].

Для целей настоящей работы был сконструирован фильтр для одновременного выделения колебаний с периодом 27 дней (1 гармоника), 13,5 дней (2 гармоника) и 9 дней (3 гармоника). Длина фильтра – 179 суток, т. е. каждое отфильтрованное значение формируется как линейная комбинация 89 предыдущих и 89 последующих значений в исходной последовательности.

Амплитудно-частотная характеристика это-

го гребенчатого фильтра приводится на рис. 3.

На рис. 4 представлена корреляционная функция фильтра. Вид корреляционной функции указывает, что связи, вносимые фильтром в результирующую кривую, необходимо учи-

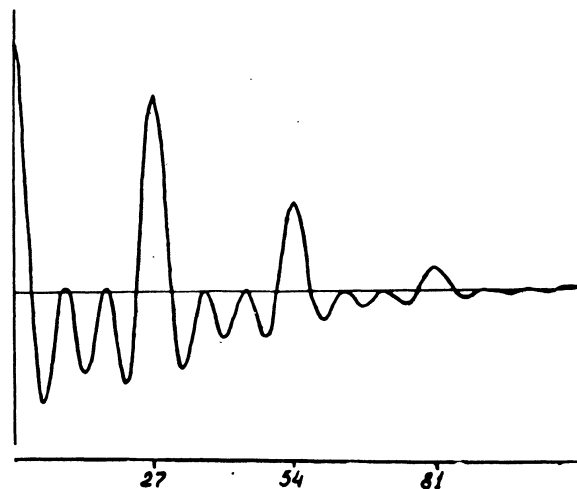


Рис. 4. Корреляционная функция числового избирательного фильтра.

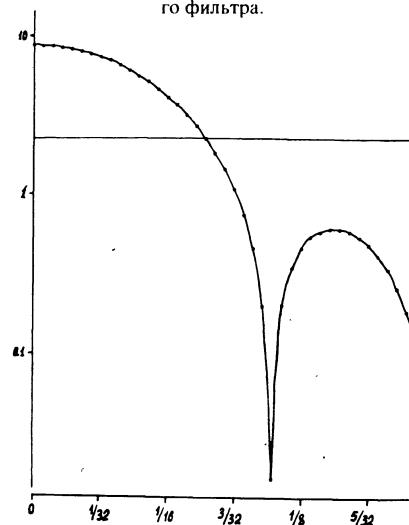


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика фильтра, формирующего индекс $SCa II(t)$.

тывать на временных интервалах длиной не менее 4-х месяцев.

Рекуррентные последовательности, по длине выходящие за границы данного интервала, можно считать независимыми.

Здесь же необходимо отметить некоторые особенности индекса $SCaII(t)$ [20]. Само определение этого индекса (см. выше) подразумевает суммирование по всем флоккулам на видимой полусфере Солнца, отстоящим на раз-

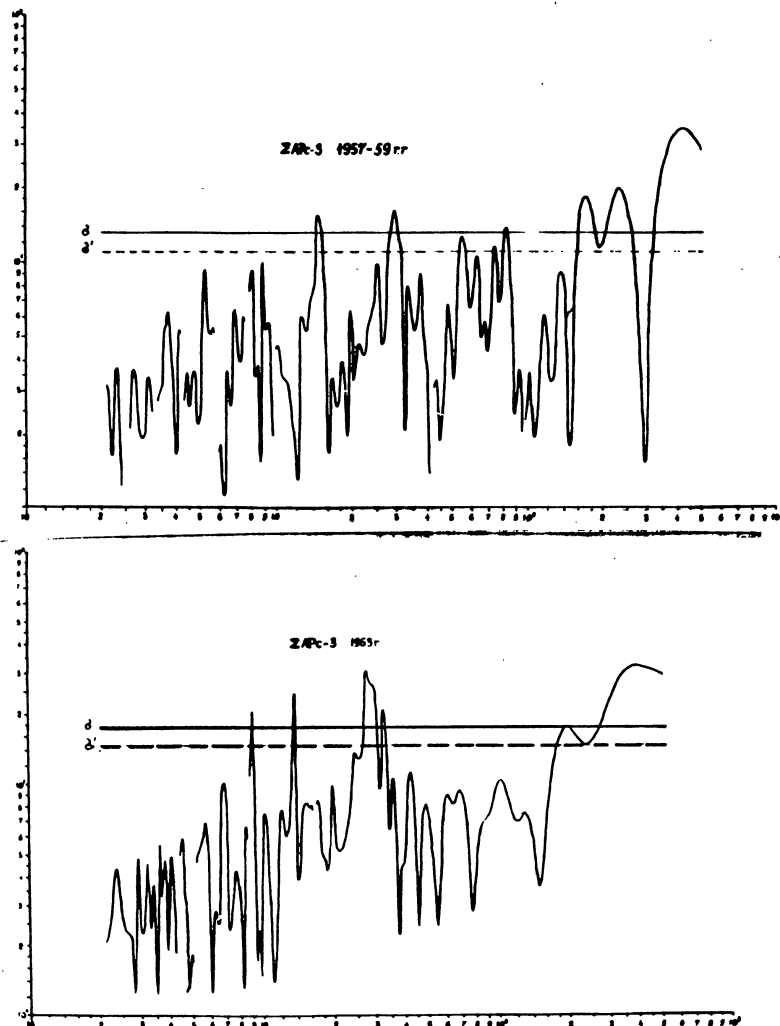
ные расстояния от центрального меридиана. Таким образом, в используемом индексе уже выполнено сглаживание истинного распределения кальциевых флоккулов, что можно рассматривать как эффект действия некоторого фильтра.

На рис. 5 представлена амплитудно-частотная характеристика фильтра, формирующего индекс $SCaII(t)$. Нетрудно видеть, что данный фильтр пропускает частоты на 1-й (27 дней) и 2-й (13,5 дней) гармониках и эффективно подавляет информацию на более высоких частотах. Поэтому при дальнейшем анализе необходимо учитывать это свойство фильтра. В частности, не должно быть неожиданным отсутствие 3-й гармоники в анализируемом спектре $SCaII(t)$. Следовательно, в индексе $SCaII(t)$ сильно ослаблено влияние индивидуальных образований, что может затруднить сопоставление и поиск солнечных ис-

точников возмущений, ответственных за возникновение $Pc3$.

Рассмотрим результаты фильтрации по эпохам цикла солнечной активности. Для максимума цикла №19 (1957–1959 гг.) характерны три интервала с увеличенными амплитудами колебаний, но различающихся по периодам повторения экстремумов (рис. 6а). Для первого интервала (15. 8. 1959–1. 9. 1958 гг.) характерны 27-29-и 30-дневные периоды повторения. В интервале 10. 1.–1. 5. 1959 г. преобладает 27-дневный период повторения, а для интервала 15. 6.–8. 10. 1959 г. основной период рекуррентности – 29–30 дней. Характерная особенность отмеченных интервалов – изменение амплитуды в форме биений, что может указывать на совокупность воздействия нескольких факторов. Переменный период рекуррентности присущ и максимуму цикла № 20 (рис. 6г).

Анализ отфильтрованного ряда индексов



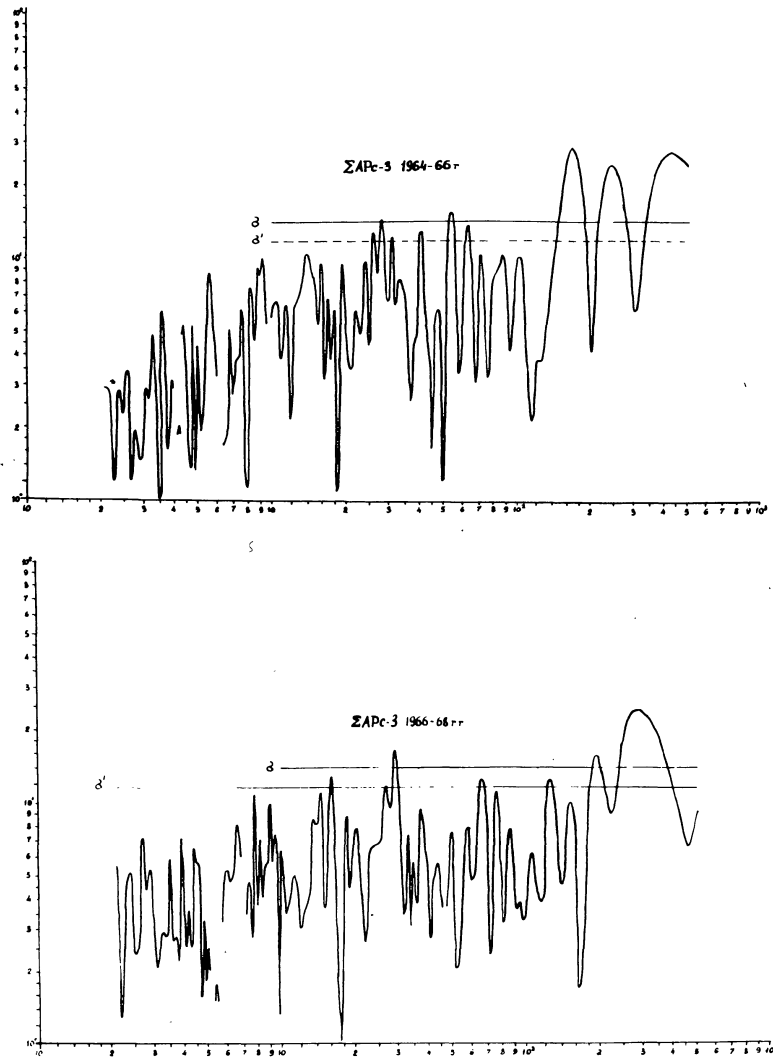


Рис. 6. а-г. Отфильтрованные ряды индексов $\Sigma APc3$ и $SCa II(t)$

$SCaII(t)$ за тот же период 1958–1959 гг. также показывает присутствие 27-дневных последовательностей. Но в отличие от кривой $\Sigma APc3$, кривая $SCaII(t)$ имеет период повторения преимущественно 27 дней.

Наиболее отчетливо 27-дневная периодичность видна в эпоху спада солнечной активности в 1962–1963 гг. (рис. 6б).

Менее определена 27-дневная периодичность в годы, близкие к эпохе минимума солнечной активности (рис. 6в). Здесь можно выделить один интервал (1. 2.–10. 6. 1965 г.) колебаний с увеличенной амплитудой и периодом повторения 27 дней.

Отфильтрованные кривые $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$ по своей форме имеют очень близкое сходство.

Общей характерной особенностью анализируемых кривых (рис. 6а–г) является сосуществование

двух возмущений или активных центров, что наиболее отчетливо прослеживается в эпоху спада активности (рис. 6б). Здесь отчетливо видно уменьшение амплитуды первой последовательности, достигшей максимального развития 1. 3. 1963 г. Возмущения имеют сравнимые амплитуды 10. 7. 1963 г., а затем доминирует амплитуда второго возмущения. Анализ рис. 2 также показывает существование рекуррентных последовательностей $\Sigma APc3$ на долготах, отстоящих друг от друга на $\sim 1/4$ оборота (№ 1776–1784).

Корреляционный периодограммный анализ

Для независимого определения периода 27-дневной радиации можно применить корреляционный

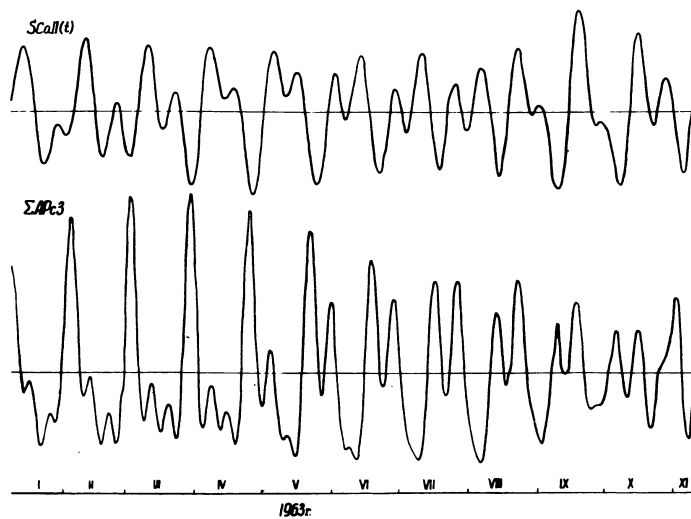
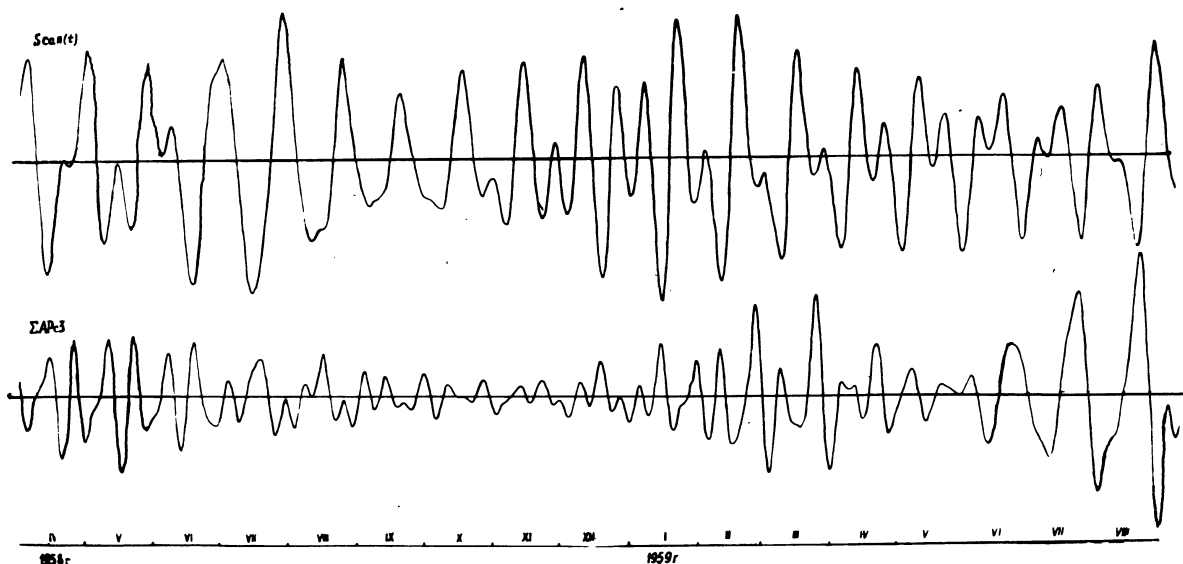
ляционный периодограммализ. Процедура применения анализа подобного вида описана в [22]. Как и в [22], в настоящей работе применяются стандартные методы для оценки множественной корреляции между исходными рядами, с одной стороны, и величинами $\cos \frac{2\pi t}{T}$ и $\sin \frac{2\pi t}{T}$, определяющими некоторую компоненту с периодом T , с другой стороны. Таким образом, строится зависимость коэффициента множественной корреляции от периода испытываемой компоненты.

Максимумы этой кривой соответствуют наиболее вероятным значениям периодов. Оценка значимости экстремумов амплитуд проводилась при вероятности случайного пре-

вышения критического уровня 0,0005 и 0,005 (горизонтальные прямые на рисунках).

Результаты вычислений представлены на рис. 7а-г. Здесь, как и раньше, ряд исходных данных разбит на участки по фазам цикла солнечной активности.

Коррелопериодограммы показывают, что в эпоху максимума солнечной активности 1957-1959 гг. и 1967-1968 гг. (рис. 7а и б) преобладающий период вариаций составлял 29 суток. В эпоху спада активности (1962-1963 гг.) отчетливо прослеживается 27-дневная периодичность и ее 2-я (13,5 суток) и 3-я (9 суток) гармоники (рис. 7в). В эпоху минимума и роста солнечной активности в анализируемый процесс основной вклад вносят колебания с периодом 28 дней (рис. 6г).



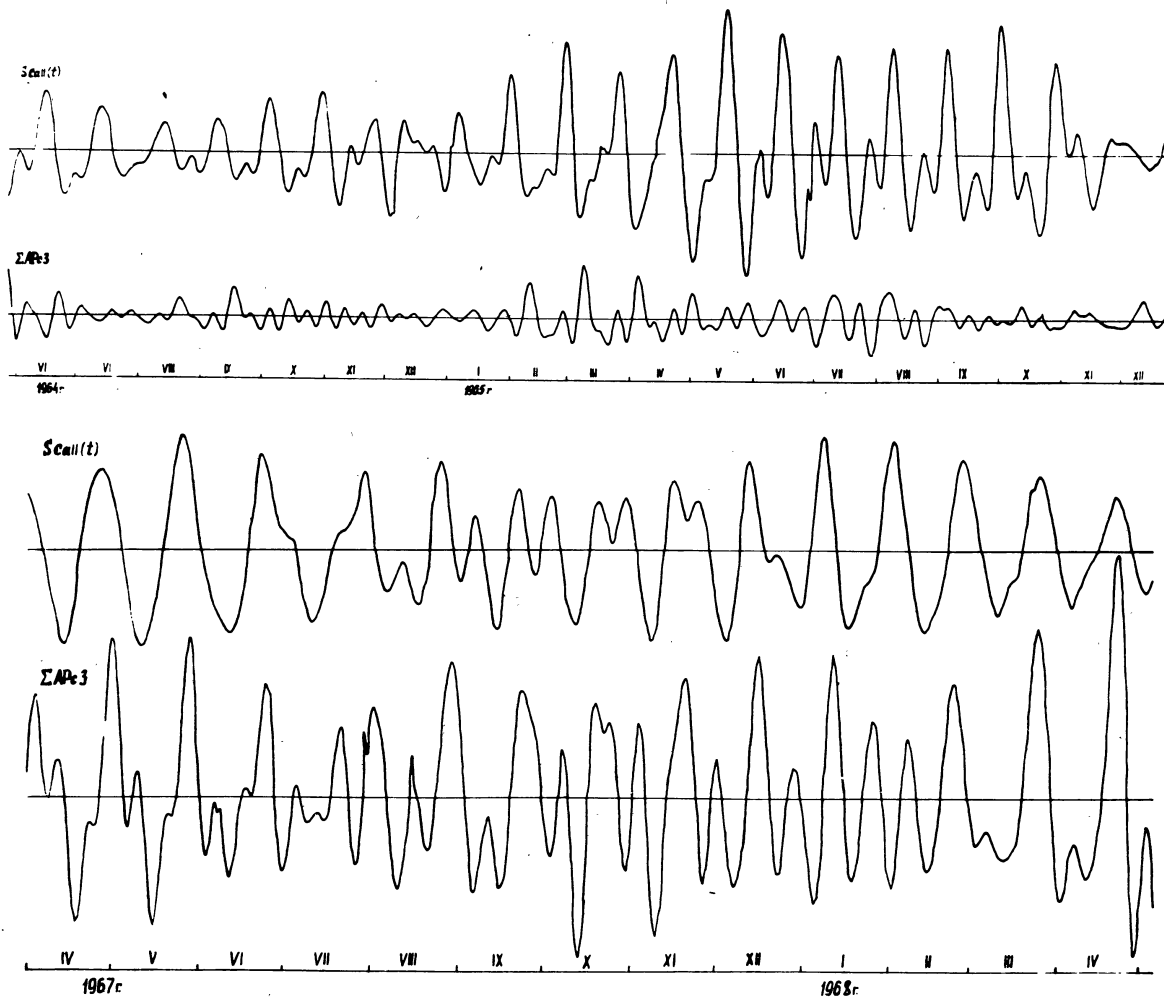


Рис. 7. а-г. Периодограммы индексов $\Sigma APc3$ для соответствующих эпох солнечного цикла.
 σ — критический уровень, вероятность превышения которого 0,0005. σ' — то же, при вероятности превышения 0,005.

Разложение по главным компонентам

Метод разложения по главным компонентам какого-либо ряда геофизических индексов подробно излагается в [23] и позволяет разделить основные части изучаемого процесса, обусловленные разными комплексами причин, и выявляет общие особенности поля. Получаемый ряд разложения часто быстро сходится, так что в ряде случаев до 95 % всей информации оказывается сосредоточено в первых 2–3 членах разложения. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только первый член разложения, который в нашем случае содержит ~70 % информации. Как и выше, обработка исходного ряда проводилась по эпохам цикла активности, за характерный интервал в каждом разло-

жении принимался период в 27 дней, т.е. анализу подвергались реализации по 27 точек. Иначе говоря, в анализе участвовали данные, приведенные на рис. 1.

Результаты разложения по главным компонентам исходного ряда индексов $\Sigma APc3$ представлены на рис. 8 и 9. На рис. 8 представлен вектор T — первый член разложения, описывающий распределение $\Sigma APc3$ внутри 27-дневки. Результат разложения индекса $\Sigma APc3$ за 1962–1963 гг. подтверждает выводы, полученные другими методами (п.п. II–IV), и показывает существование двух пиков рекуррентности в 5–9 и 15–17 дни оборота. Два близких пика рекуррентности можно отметить и для 1964–1966 гг. в 6–10 дни оборота. Разложения индекса за годы максимума не дают четких

закономерностей. Это, вероятно, связано с тем, что корреляционная матрица разложения строится по 27-ми дням, а период рекуррентности в эпоху максимума ~29 дней, как показывают результаты фильтрации и периодограмм-анализ.

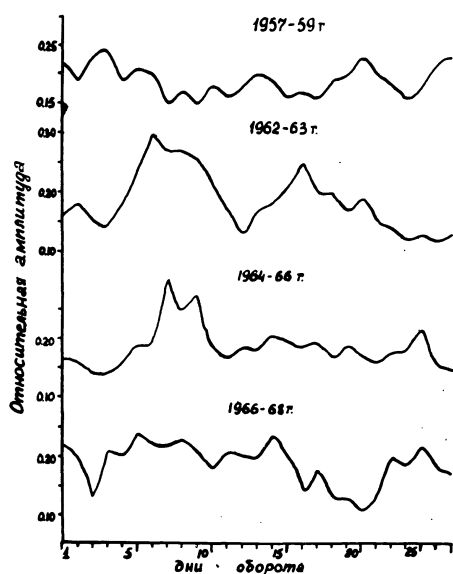


Рис. 8. Первый член разложения по главным компонентам (вектор T), описывающий распределение $\Sigma APc3$ внутри периода, соответствующего одному обороту Солнца.

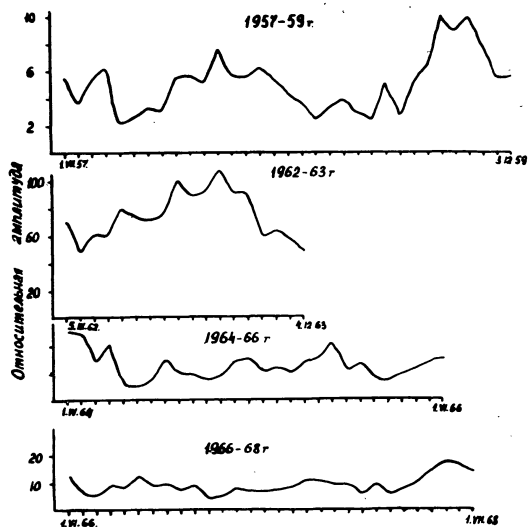


Рис. 9. Коэффициент при первом члене разложения (вектор X), описывающий изменение вектора T от оборота к обороту.

Временные изменения индекса $\Sigma APc3$ от оборота к обороту описывает коэффициент при первом члене разложения (вектор X) (рис. 9). Кривая, описывающая изменение вектора

от оборота к обороту для 1962–1963 гг. вновь подтверждает существование долгоживущей активной области. Кривая для 1964–1966 гг. показывает наличие рекуррентных областей в начале анализируемого периода – апрель–август 1964 г. и в начале 1965 г. Наличие рекуррентной области в 1959 г. (V–XII месяцы) показывает кривая для максимума цикла № 19, что подтверждается и анализом рис. 1. Существование недолгоживущей рекуррентной области можно отметить и в цикле № 20.

Кривые рис. 8 и 9 дают однозначный результат, который сравнительно легко можно истолковать только в эпоху спада солнечной активности (при четко выраженной периодичности). Этот метод также показывает отсутствие 27-дневных периодов повторения геомагнитных возмущений в годы, близкие к эпохе максимума солнечной активности, что является косвенным подтверждением результатов, полученных в п.п. II–IV.

Спектральный анализ

Для корректной и более привычной оценки периодов рекуррентности индексов $\Sigma APc3$ мы воспользовались спектральным анализом исходных рядов данных. Весь временной ряд индексов $\Sigma APc3$ за период 1958–1968 гг. разбит на 8 реализаций следующим образом: реализация для 1958, 1959, 1963, 1965, 1966 гг. содержит 365 значений, реализация для 1964 г. – 306, а для 1967 и 1968 гг. – по 273 значения.

На рис. 10 представлен спектр по годам цикла. Сплошной кривой обозначен спектр, вычисленный по автокорреляционной функции с максимальным сдвигом 112 точек (по реализациям в 365 значений) и с максимальным сдвигом 84 точки (по неполным реализациям). Пунктирной кривой обозначен спектр, вычисленный по автокорреляционной функции с максимальным сдвигом в 2 раза меньше. Вычисление спектра выполнено с использованием спектральных окон Бартлетта [24] и Тьюки [24]. Спектры мало различимы, поэтому представлен спектр, вычисленный с использованием окна Бартлетта (рис. 10). Масштаб спектрального окна дается в верхней части рис. 10. По оси ординат откладывается логарифм нормированного спектра $\lg S(f)\sigma_f^2$. Здесь же отрезками вертикальных прямых

дается 90 % доверительный интервал для обоих вариантов величины максимального сдвига. Масштаб шкалы частот — сутки⁻¹, знаком * на рис. 10 отмечены гармоники, максимальные значения которых совпадают при вычислениях по корреляционным функциям

равным ширине спектрального окна, и отнесем их к частотам, на которые центрировано окно. По смыслу это логарифм отношения независимых оценок спектральной плотности, которое подчиняется распределению Фишера с $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ степенями свободы. Теперь мы

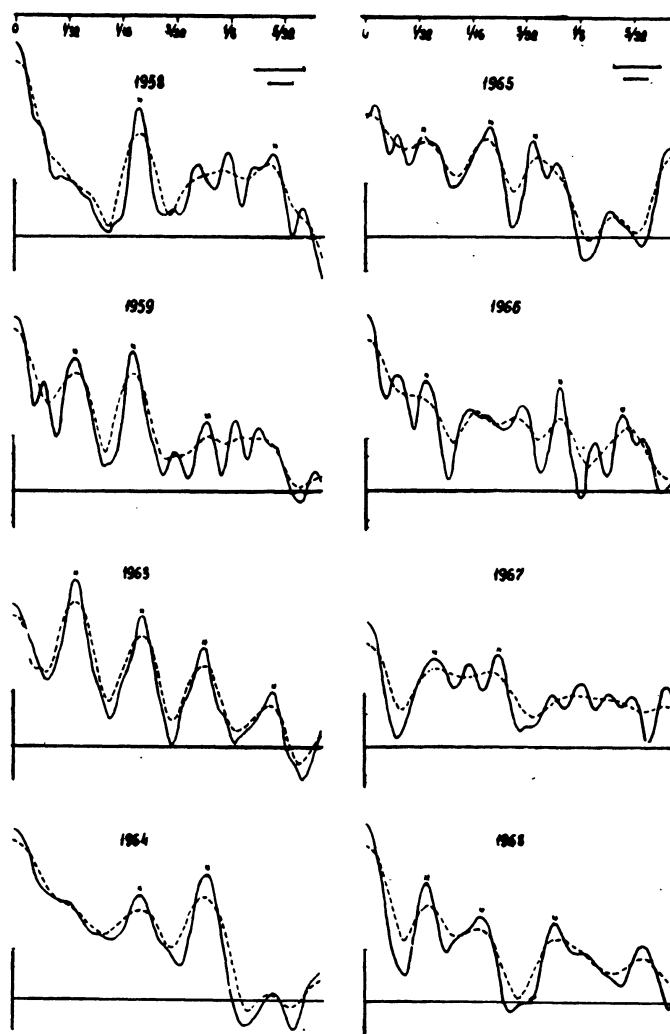


Рис. 10. Спектры индексов ΣAPсЗ.

с $\tau = 112$ (84) и 56 (42) и которые мы полагаем реальными пиками.

Число степеней свободы ν , определяющее точность оценки спектра, составляет 9,8 для 7 реализаций (кроме 1964 года, где $\nu = 10,9$) при сдвиге $\tau = 112$ (84). Определение периода, соответствующего реальному пику в спектре, и оценка точности этого определения были выполнены с помощью следующей сконструированной нами процедуры. Сформируем первые разности величины $\lg \overline{S(f)}/\sigma_f^2$ с шагом,

можем найти частоту пика как то значение, при котором первая разность обращается в нуль (путем обратной интерполяции), а границы доверительного интервала как значения частоты, при которых первая разность равна $\pm \lg F_{кр}$.

Таким образом, неопределенность в величине найденного периода зависит от максимального значения крутизны спектрального пика, отнесенной к интервалу частот, равному ширине спектрального окна. Результаты наших

определений периода рекуррентности по разным гармоникам и в различные годы вместе с доверительными интервалами на уровне 50 % приведены на рис. 11. Характерна значительная неопределенность полученных выше периодов, обусловленная самой природой рекуррентности и динамичностью процессов на Солнце и в межпланетном пространстве. Это дает нам основание считать в высшей степени иллюзорной ту точность определения периода рекуррентности ряда гелио- и геофизических явлений, вычисляемых по последовательностям продолжительностью год и менее, которая у некоторых авторов [27] имеет порядок 0,1 суток.

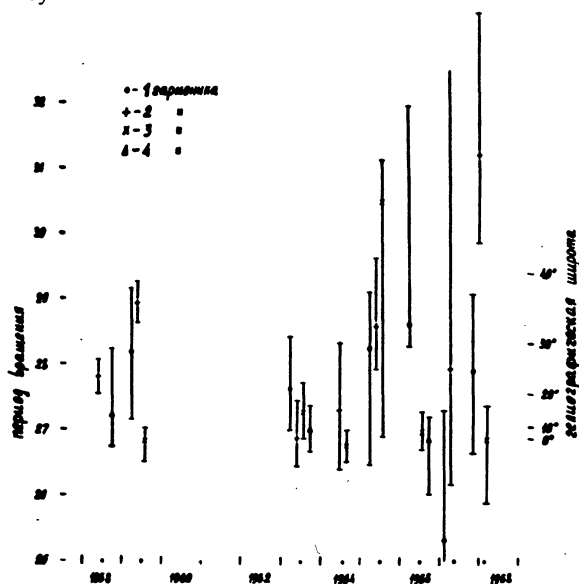


Рис. 11. Значения периода рекуррентности индекса $\Sigma APc3$ в 1958—1968 гг.

Характерно, что общий ход значений периода рекуррентности, найденных по первым гармоникам, совпадает с уже известными закономерностями, упомянутыми выше. Примечательно, что значения периода рекуррентности, определенные по третьим и четвертым гармоникам, имеют тенденцию сосредотачиваться вблизи 27^d . Возникающее при этом в эпоху максимума солнечной активности несоответствие периодов первых и последующих гармоник (некратность гармоник), довольно любопытно.

Основные итоги

1. Кратко попытаемся изложить выше. Результаты обработки достаточно надежно

позволяют описать суммарную вариацию периода рекуррентности индекса $\Sigma APc3$, максимальный период (28,5 дней) наблюдается в годы после минимума (1965—66 гг.), в эпоху максимума период рекуррентности ~ 28 дней и уменьшается до 27 дней в эпоху спада солнечной активности.

2. Спектральный и периодограммный анализ показывают высокую степень кратности гармоник на фазе спада и некратность гармоник в начале и в эпоху максимума цикла.

3. Спектральный анализ показывает отсутствие первых гармоник (27 дней) в спектре рекуррентности в 1958 и 1964 гг.

4. Значения периода рекуррентности, определенные по третьим и четвертым гармоникам, имеют тенденцию сосредотачиваться вблизи 27 дней.

5. Обработка числовым узкополосным фильтром рядов индексов $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$ выявляет случаи одновременного сосуществования на различных долготах геоэффективных образований, находящихся на различных фазах развития. Наблюдается и последовательная смена этих образований. Отмеченная закономерность наиболее очевидна в эпоху спада солнечной активности.

6. Мы не приводим в этой работе вычисленных корреляционных функций, поскольку они имеют в разные годы весьма произвольный вид: главным максимумам соответствуют и отрицательные и положительные сдвиги, иногда даже нельзя выделить главный максимум. Сопоставление рядов индексов $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$ обеспечивает неплохое однозначное соответствие лишь при использовании достаточно коротких интервалов времени (несколько месяцев) или же на ветви спада солнечного цикла.

По-видимому, этим и обусловлена неудача с кросскорреляционными функциями.

Обсуждение

Поскольку исследуемый индекс $\Sigma APc3$ показывает высокую корреляцию со скоростью солнечного ветра при умеренной возмущенности межпланетного магнитного поля (3, 4, 8), то структура временного ряда этого индекса отражает общую структуру высокоскоростных потоков солнечного ветра. Области истечения солнечной плазмы должны находиться в неко-

тором отношении к участкам поверхности Солнца, нагретым и занятым магнитным полем умеренной величины, т.е. к кальциевым флоккулам. Этим и объясняется наше внимание к связям между индексами $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$.

Использованные методы оказались достаточно эффективными для выявления рекуррентных процессов. Надежно выявлена вариация периода рекуррентности индекса $\Sigma APc3$ в зависимости от фазы цикла солнечной активности. Найденные значения периодов рекуррентности индекса $\Sigma APc3$ и структур в межпланетном поле может быть истолковано как указание на причинные связи этих явлений и на идентичность источников вариаций.

Для построения конкретных физических моделей важна точность оценки периодов по спектру. Несмотря на сравнительно большой объем статистических выборок, наши результаты характеризуются существенной неопределенностью в оценках периодов и разбросом. Однако эти свойства присущи самому изучаемому процессу. Если в эпоху спада солнечной активности (1962–1963 гг.) узость спектральных пиков и кратность гармоник соответствуют и устойчивой регулярной секторной структуре [25] и неизменному распределению активности на Солнце, то на ветви роста и в эпоху максимума на различных долготях сравнительно равномерно возникают активные образования с продолжительностью жизни довольно сильно варьирующей, что приводит к размыванию спектральных пиков и некоторому их смещению, которые отражают неустойчивость и изменчивость пространственной структуры, высокоскоростных потоков солнечного ветра. Характерно и то, что в эту эпоху (1966–1968 гг.) спектр на большом интервале частот располагается практически внутри доверительного интервала для «белого шума» (уровню «белого шума» соответствуют горизонтальные линии на рис. 10). Возникновение новых секторов, сдвиг их границ – так можно расшифровать явление не кратности гармоник. Возможно и несколько иное толкование: существование независимых структур с различными периодами вращения, источники которых должны располагаться на различных широтах.

Последняя ситуация мыслима, если на Солнце реализуется следующая картина пространственного распределения источников.

В некотором долгом интервале источник располагается только в одном полушарии и на высоких широтах. На других широтах в этом же долгом интервале активность отсутствует и выражена слабо. В этом случае граница конуса воздействия может отклониться или сместиться к экватору и на некотором расстоянии от Солнца пересечь плоскость эклиптики (сходные идеи высказывались и в [28]). Таким образом, в плоскости эклиптики могут появиться высокоскоростные потоки, вращающиеся с другой угловой скоростью. Аналогично можно объяснить и тот факт, что в начале цикла наблюдаются периоды рекуррентности, близкие к 28–29 суткам и соответствующие скорости вращения фотосферы на широтах 25–35°, хотя Земля может проектироваться на поверхности Солнца лишь в интервале широт $\pm 7^\circ$. Для текущего 20-го цикла это может быть особенно типичным, поскольку его развитие протекало в южном полушарии с запаздыванием на 1–1,5 года по сравнению с северным.

Любопытно, что в 1958 и 1964 гг. первая гармоника отсутствовала. Это говорит о том, что существовала симметрия 2-го порядка в расположении высокоскоростных потоков («квадрупольная» симметрия) и число их было четно. Подобное распределение фоновых полей в фотосфере, аппроксимируемое квадруполем, было получено Альтшулером и др. для 1962–1964 гг. [29].

Стремление периодов рекуррентности, определенных по 3-й и 4-й гармоникам, сосредотачиваться около величины 27 d, находит себе простое объяснение. Эти гармоники отражают влияние индивидуальных крупномасштабных образований, участвующих в формировании высокоскоростных потоков и расположенных в низких широтах, где фоновые поля вращаются с примерно постоянной скоростью, соответствующей периоду ~ 27 d [30], независимо от цикла активности. Следовательно, они могут быть использованы как постоянная реперная система для определения запаздывания геофизических явлений относительно процессов на Солнце. К сожалению, в нашем случае спектр $SCaII(t)$ практически не содержит этих гармоник из-за его своеобразного сглаживания, о котором уже говорилось выше.

Мы уже упоминали о неудаче при попытке истолковать кросскорреляционные функции. В таком случае можно попытаться использовать результаты фильтрации рядов $\Sigma APc3$

и $SCaII(t)$ (см. рис. ба-г). Предположим, что участки кривых, имеющие близкую форму, соответствуют явлениям, объединяемым причинно-следственной связью. Выявление таких взаимосвязанных участков довольно затруднительно и возможно в небольшом числе случаев. Приходится ориентироваться по ходу огибающей и по положению субмаксимумов. Иногда имеет место и различие периодов рекуррентности, т.е. «сползание по фазе» отождествляемых участков рядов $\Sigma APc3$ и $SCaII(t)$. Примерами найденных отождествлений могут быть следующие участки:

$\Sigma APc3$

1963 апрель
и следующие месяцы
1965 февраль–март
1967 август

$SCaII(t)$

1963 апрель
и следующие месяцы
1965 март
1967 сентябрь.

Рассмотрим истолкование такого отождествления. Если мы считаем кальциевые флоккулы непосредственным безынерционным источником высокоскоростных потоков, то необходимо отождествлять ближайшие максимумы. Для наших примеров и ряда других случаев это приводит к отрицательному запаздыванию до 7 суток, т.е. к обращению причинно-следственной связи, что абсурдно. Предполагая же, что источник расположен к западу от флоккула, и учитывая транспортное время порядка 4 суток, получим разность долгот $\sim 130-140^\circ$ (10–11 суток). Обычно в этом месте имеется слабый минимум в $SCaII(t)$, который трудно ассоциировать с мощным максимумом в $\Sigma APc3$. Модель конуса избегания, получившая в последнее время мощную поддержку в виде недавно открытых «корональных дыр», например [31], также неприемлема.

Как правило, глубокие минимумы в $SCaII(t)$ располагаются практически напротив высоких максимумов в $\Sigma APc3$, т.е. запаздывание составляет 0—1 сутки и скорость потока должна быть немыслимо велика. Таким образом, мы остановились на указанном выше отождествлении, считая, что также должно соблюдаться соотношение амплитуд главных и вторичных максимумов и в $SCaII(t)$, и в $\Sigma APc3$. Правда в некоторых случаях можно оспаривать наше

отождествление. Например, приемлемо соответствие участков $SCaII(t)$ и $\Sigma APc3$ в ноябре и декабре 1967 г., что даёт запаздывание 1–3 суток (величина довольно экзотическая).

Итак, мы получаем запаздывание от 20 до 30–35 суток. Верхний предел хорошо согласуется с концепцией инерционной переработки локальных магнитных полей. Еще ранее отмечалось, что на кросскорреляционных кривых «фоновые поля – межпланетное поле» максимум при сдвиге ~ 31 d выше, чем при сдвиге ~ 4 d [32]. Это обычно объясняется тем, что трансформация локальных полей в фотосфере в магнитную структуру под поверхностью квазиисточника солнечного ветра, обеспечивающую истечение высокоскоростных потоков, требует около 30 d (около 1 оборота) [33]. Однако нижний предел трудно объяснить. Ему соответствует скорость порядка 100 км/сек, что соизмеримо со скоростью распространения альфвеновской волны в межпланетном пространстве. Вообще говоря, предполагается, что источником пульсаций $Pc3$ могут быть альфвеновские волны [8], которые распространяются без затухания на расстоянии ~ 1 а.е. [18, 34]. В работе [35] считается, что возмущения в неоднородной структуре солнечного ветра должны распространяться именно так. Однако тогда с трудом воспринимается то обстоятельство, что возмущение покидает поверхность Солнца со стороны, противоположной нам и невидимой. Кроме того, на больших расстояниях от Солнца энергия направленного движения солнечного ветра больше энергии межпланетного магнитного поля и все возмущения, в том числе и альфвеновские волны, должны сноситься ветром с его скоростью.

Мы полагаем возможным говорить, что наши результаты указывают на наличие определенной связи между распределением кальциевых флоккулов на Солнце и закономерностями активности геомагнитных пульсаций $Pc3$, но не рискуем предложить для описания этой связи конкретную модель. Для этого требуется более детальный анализ связи по индивидуальным явлениям в кальциевых флоккулах, солнечном ветре и пульсациях $Pc3$.

Вычисления были выполнены на ЭВМ БЭСМ-4 по программе одного из авторов (ГК). Авторы благодарны П. А. Виноградову за внимание к работе и Т. Н. Полошкиной и Н. П. Соболевой за помощь в обработке материалов на ЭВМ.

Литература

1. TROITSKAYA, V. A., GUEELMI, A. V. (1969): *Space Sci. Rev.*, 7, 689.
2. ТРОИЦКАЯ, В. А., ГУЛЬБЕЛЬМИ, А. В. (1968): *УФН*, 97, 453.
3. SAITO, T. (1964): *Rep. Ion. Space Res. Jap.*, 13, No. 13, 1964.
4. ВИНОГРАДОВ, П. А., ПАРХАНОВ, В. А. (1971): *Исслед. по геом., аэр. и физике Солнца*, вып. 13, 22.
5. ТРОИЦКАЯ, В. А., ПЛЯСОВА-БАКУНИНА, Т. Н., ГУЛЬБЕЛЬМИ, А. В. (1971): *Докл. АН СССР*, т. 197, 6, 1312.
6. ВИНОГРАДОВ, П. А., ПАРХОМОВ, В. А. (1972): *Исслед. по геом., аэр. и физике Солнца*, вып. 24, 223.
7. ТРОИЦКАЯ, В. А., БОЛЬШАКОВА, О. В. (1968): *Докл. АН СССР*, 180, № 2.
8. ВИНОГРАДОВ, П. А., ПАРХОМОВ, В. А. (1972): *Исслед. по геом., аэр. и физике Солнца*, вып. 24, 232.
9. ТРОИЦКАЯ, В. А., БОЛЬШАКОВА, О. В., МАТВЕЕВА, Э. Т., ЩЕПОСТНОВ, Р. В. (1969): *Геом. и аэрон.*, 9, № 1, 129.
10. SAITO, T. (1969): *Space Sci. Rev.*, 10, No. 3.
11. ALLEN, C. W. (1964): *Planet. Space Sci.*, 12, 487.
12. МУСТАЛЬ, Э. Р. (1961): *Астрон. ж.*, 38, 28.
13. DESSLER, A. J., FEJER, J. A. (1963): *Planet. Space Sci.*, 11, 505.
14. PIDDINGTON, J. H. (1964): *Planet. Space Sci.*, 12, 113.
15. PIDDINGTON, J. H. (1968): *J. Roy. Astron. Soc.*, 15, No. 1—2.
16. NEPPNER, J. P. et. al. (1969): *Rept. X-612-69-429, Maryland*.
17. FAIRFIELD, D. H. (1969): *J. Geophys. Res.*, 74, No. 14, 3541.
18. BELCHER, J. W., DAVIS, J. (1971): *J. Geophys. Res.* 76, No. 16, 3534.
19. AMBROŽ, P. (1972): *Bull. Astron. Inst. Czech.*, 23, No. 4, 232.
20. SWARTZ, W. E., OVERBEEK, R. (1971): *Rept. PSU-IRL-SCJ 373*.
21. ЛУЗОВ, А. А., КУКЛИН, Г. В., ПЕЖЕМСКИЙ, А. И. (1965): *Геом. и аэрон.*, 5, 392.
22. КОПЕЦКИЙ, М., КУКЛИН, Г. В. (1971): *Исслед. по геом., аэр. и физике Солнца*, вып. 2, 167.
23. ВЕРТЛИБ, А. Б., КОПЕЦКИЙ, М., КУКЛИН, Г. В. (1971): *Исслед. по геом., аэр. и физике Солнца*, вып. 7, 194.
24. ДЖЕНКИНО, Г., ВАТТС, Д. (1972): *Спектральный анализ и его приложения*. Мир.
25. SVALGAARD, L. (1972): *J. Geophys. Res.*, 77, No. 22, 4027.
26. WILCOX, J. M. (1968): *Space Sci. Rev.*, 8, 258.
27. WILCOX, J. M., COLBURN, D. S. (1972): *J. Geophys. Res.*, 77, No. 2, 751.
28. COLEMAN, P. L. Jr., ROSENBERG, L. R. (1972): *J. Geophys. Res.*, 74, No. 3, 2917.
29. ALTSCHULER, M. D. et. al. (1971): In: R. Howard (Ed.), *Solar Magnetic Fields. Proc. IAU Symp. Paris 1970*.
30. WILCOX, J. M., SHATTEN, K. H., TANENBAUM, A. S. (1970): *Solar Phys.*, 14, 255.
31. KRIGER, A. et al. (1973): *Solar Phys.*, 29, No. 2, 505.
32. SEVERNY, A. et al. (1970): *Solar Phys.*, 15, No. 1.
33. Отчет по теме № 73. 1973, фонды СибИЗМИР.
34. ТОПТЫГИН, И. Н. (1972): В сб. «Единообразие ускорения частиц в различных м. штабах космоса», с. 267, Л.
35. ШАБАНСКИЙ, В. П., СМЕРНОВА, Л. П. (1973): *Геом. и аэрон.*, 13, № 4, 561.
36. ПАРХОМОВ, В. А., ВИНОГРАДОВ, П. А. (1973): *Препринт СибИЗМИР*, № 6—73.