

УДК 523.98

Особенности циклических вариаций крупномасштабного магнитного поля Солнца и их связь с солнечной и геомагнитной активностью

Т.Е. Вальчук¹, Ю.С. Загайнова¹, В.Г. Файнштейн²

¹ ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, г. Москва, Троицк, Россия
yuliazag@izmiran.ru

² ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия
vfain@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 8 октября 2013 г.

Аннотация. Показано, что в 21–22 циклах солнечной активности характер изменения длины $L(t)$ нейтральной линии (НЛ) магнитного поля на поверхности источника существенно отличается от характера циклических изменений чисел Вольфа $W(t)$. В 23 цикле активности различие между $L(t)$ и $W(t)$ увеличивается: на профиле $L(t)$ образуется плато длительностью ≈ 4 года. Изменение со временем максимального отклонения НЛ от плоскости экватора $D(t)$ согласуется с изменением $W(t)$ в 21 и 22 циклах. В 23 цикле $D(t)$ становится примерно в 2 раза шире на полувьсоте, чем $W(t)$, и на временном профиле $D(t)$ появляется плато длительностью ≈ 3 года. Установлено, что характер циклических изменений коэффициентов разложения поля по сферическим функциям отличается от характера изменения $W(t)$. Обнаружены особенности в изменении суммарных значений числа корональных выбросов массы (КВМ) N_{CME} за каждый месяц, перед началом и в период затянувшегося минимума активности. Предположено, что обнаруженные особенности в поведении $L(t)$, $D(t)$ и N_{CME} во время 23 цикла могут отражать “подготовку” Солнца к затяжному минимуму активности между 23 и 24 циклами. Характер изменения $N_{CME}(t)$ качественно согласуется с временным ходом $D(t)$. Установлено, что в затянувшемся минимуме между 23–24 циклами число зарегистрированных SSC и SI существенно превышает число всех гало КВМ и “полугало” КВМ, наблюдавшихся в это время.

FEATURES OF CYCLIC VARIATIONS IN THE SUN'S LARGE-SCALE MAGNETIC FIELD AND THEIR RELATION TO SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY, *by T.E. Valchuk, Yu.S. Zagainova, V.G. Fainshtein.* We show that the pattern of variations in length $L(t)$ of neutral line (NL) of the magnetic field on the source's surface during solar cycles 21 and 22 differs significantly from the pattern of cyclic variations in the Wolf numbers $W(t)$. During solar cycle 23, the difference between $L(t)$ and $W(t)$ becomes more significant: there is a plateau (about 4 years) in the $L(t)$ profile. Time variations in the NL maximum deviation from the equatorial plane $D(t)$ conform with variations $W(t)$ during solar cycles 21 and 22. During solar cycle 23, $D(t)$ is about 2 times wider at half-height than $W(t)$, and there is a plateau (about 3 years) in the $D(t)$ time profile. The pattern of cyclic variations in the field expansion coefficient in terms of spherical functions differs from the pattern of variations $W(t)$. We have revealed specific features of time variations in the CME monthly value N_{CME} before and during the prolonged solar minimum. We suppose that the features revealed in variations $L(t)$, $D(t)$ and N_{CME} during solar cycle 23 can reflect the “preparation” of the Sun for the prolonged solar minimum between solar cycles 23 and 24. The pattern of variations $N_{CME}(t)$ is qualitatively consistent with time variations $D(t)$. The number of SSCs and SIs

recorded during the prolonged solar minimum between solar cycles 23 and 24 is much higher than that of all halo and semi-halo CMEs observed over this period.

Ключевые слова: солнечная корона, солнечная активность, геомагнитная активность, длина нейтральной линии на поверхности источника

1 Введение

Магнитное поле Солнца характеризуется иерархией масштабов от самых маленьких, сопоставимых с пространственным разрешением магнитографа (самое высокое разрешение у современных магнитографов $< 1''$), до масштабов, сравнимых с размером Солнца. Исследование связи между магнитными полями разных масштабов, в том числе изучение соответствия между временными вариациями их различных характеристик, может быть использовано для поиска ответа на такие важные вопросы солнечной физики: как формируются магнитные поля разных пространственных масштабов? Какова роль магнитных полей разных масштабов в 11-летнем и 22-летнем циклах солнечной активности?

В ряде работ были сопоставлены циклические вариации характеристик крупномасштабного магнитного поля и пятенной активности Солнца (см., например, Макаров, Тлатов, 2000a; Макаров, Тлатов, 2000b). В работе (Макаров, Тлатов, 2000a) с числами Вольфа W сравнивалась суммарная длина нейтральной линии $L(t)$ крупномасштабного поля на поверхности Солнца, полученная с использованием α магнитных синоптических карт (Макаров и др., 1986), или специальный индекс на основе $L(t)$: $K(t)$. Оказалось, что максимум и минимум $K(t)$ в 11-летнем цикле опережает максимум и минимум $W(t)$ в соответствующем цикле на ≈ 5.5 лет. В работах (Макаров, Тлатов, 2000b; Михайлуца, 1993) с пятенной активностью сопоставлялись различные комбинации коэффициентов разложения магнитного поля в потенциальном приближении по сферическим функциям (Альтшулер и др., 1977). Эти коэффициенты также являются характеристиками крупномасштабного поля на Солнце. В работе (Михайлуца, 1993) был сформирован специальный индекс из коэффициентов, соответствующих дипольной и октупольной компонентам магнитного поля. И в этом случае оказалось, что циклы этого индекса предшествуют циклам солнечных пятен на ≈ 5.5 лет, т. е. находятся с ними в противофазе.

В работе (Ванг, Шили, 1990) анализировалась циклическая зависимость еще одной характеристики крупномасштабного магнитного поля – рассчитанной в потенциальном приближении суммарной площади S_K оснований открытых магнитных трубок на уровне фотосферы (суммирование проводится по индексу K). Была обнаружена отчетливая зависимость $\sum S_K$ от фазы одиннадцатилетнего цикла: эта величина, усредненная по быстрым осцилляциям, с уменьшением активности возрастает.

Важным направлением исследования циклических вариаций различных характеристик солнечной активности является сопоставление изменений этих характеристик с числом или параметрами геомагнитных бурь. Результаты таких исследований могут использоваться, в том числе, в прогностических целях – для предсказаний геомагнитных возмущений. В работе (Обридко и др., 2013) число бурь двух типов: с внезапным и постепенным началом было сопоставлено с числами Вольфа. Оказалось, что изменение в цикле активности числа бурь первого типа относительно неплохо коррелирует с $W(t)$, в то время как для бурь второго типа эта корреляция практически отсутствует. Было также показано, что число КВМ с угловым размером, большим 120° , коррелирует с числом бурь с внезапным началом и с числами Вольфа. Авторы работы (Гопалсвами и др., 2007) пришли к выводу, что 71 % всех гало КВМ, источники которых были на видимом диске Солнца, являются геоэффективными. Доля геоэффективных выбросов, источники которых были удалены от центра солнечного диска не более чем на 45° , составила 75 %. Временной профиль числа самых сильных бурь (с $max |Dst| > 100$ нТ) в 23 цикле (до 2006 г.) близок к временным профилям числа всех

КВМ типа гало (ГКВМ) с источниками на видимом диске Солнца и числа наиболее геоэффективных ГКВМ.

В данной работе изучались циклические вариации двух характеристик крупномасштабного магнитного поля на поверхности источника в расчетах магнитного поля в короне в потенциальном приближении – на сфере радиусом $R_{SS} = 2.5R_{\odot}$ (где R_{\odot} – радиус Солнца). К таким характеристикам относится длина нейтральной линии (НЛ) магнитного поля и ее максимальное отклонение от экватора. Этим наша работа отличается от работ, в которых, как правило, в качестве характеристик крупномасштабного магнитного поля использовались параметры поля на поверхности Солнца (см., например, Макаров, Тлатов, 2000а; Макаров и др., 1986). Кроме того, как и в ряде других работ (Макаров, Тлатов, 2000б; Михайлуца, 1993), были изучены изменения со временем различных комбинаций коэффициентов разложения магнитного поля по сферическим гармоникам. Эти коэффициенты также являются характеристиками крупномасштабного магнитного поля. И, наконец, изменения со временем характеристик крупномасштабного поля были сопоставлены с циклическими вариациями числа геомагнитных бурь и числа КВМ.

2 Данные и методы исследования

Для нахождения длины нейтральной линии $L(t)$ и отклонения НЛ $D(t)$ от плоскости солнечного экватора использовались НЛ, полученные из расчетов магнитного поля в потенциальном приближении в Wilcox Solar Observatory (WSO) в Стенфорде (США) – <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>. Длина НЛ определялась в радиусах Солнца. На рис. 1 (А) показан пример рассчитанной НЛ, приведена ее длина и показаны наибольшие отклонения НЛ к северу ($D1$) и к югу ($D2$) от экватора, с помощью которых находилась величина D : $D = (D1 + D2)/2$. Здесь $D1$ и $D2$ – положительные величины, измеряемые в градусах. Значения L и D присваивались моменту времени, соответствующему середине синоптического оборота. Для синоптической карты на рис. 1 (А) этот момент соответствует 18 февраля 2007 г. (≈ 12 часов). Расчеты L и D производились с помощью специальной программы, написанной в среде IDL 6.1.

Разложение потенциала магнитного поля по сферическим гармоникам имеет вид (Альтшулер и др., 1977): Здесь g_n^m и h_n^m – коэффициенты разложения потенциала Ψ .

$$\Psi(r, \theta, \phi) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n f_n(R) P_n^m(\theta) (g_n^m \cos m\theta + h_n^m \sin m\theta). \quad (1)$$

Для анализа мы использовали мультиполярные спектры S_n , определяемые следующим образом:

$$S_n = \sum_m [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]. \quad (2)$$

Например, спектр дипольной компоненты определяется следующим образом:

$$S_1 = (g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2. \quad (3)$$

Данные о коэффициентах разложения потенциала размещены на сайте <http://wso.stanford.edu/Harmonic.los/ghlist.html>. Пятенная активность Солнца характеризовалась месячными числами Вольфа $W(t)$, размещенными на сайте http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt.

С циклическими вариациями солнечных пятен и числа геомагнитных бурь сопоставлялись изменения со временем полного числа КВМ и КВМ, объединенных в класс “полугало” КВМ + полные гало (или просто – гало) КВМ. Сведения обо всех КВМ брались из каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, а сведения о гало КВМ – из каталога http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.html. Для подсчета числа бурь с внезапным началом (SSC) и числа зарегистрированных внезапных импульсов (SSI) были использованы геомагнитные данные обсерватории “Москва”: каталог геомагнитных бурь (Каталог, 2011) и собственно магнитограммы для проверки правильности определений SSI и SSC. Для периода 2012–2013 гг. использовались данные Solar Geophysical Data, Boulder <http://www.swpc.noaa.gov/Data/-indices>.

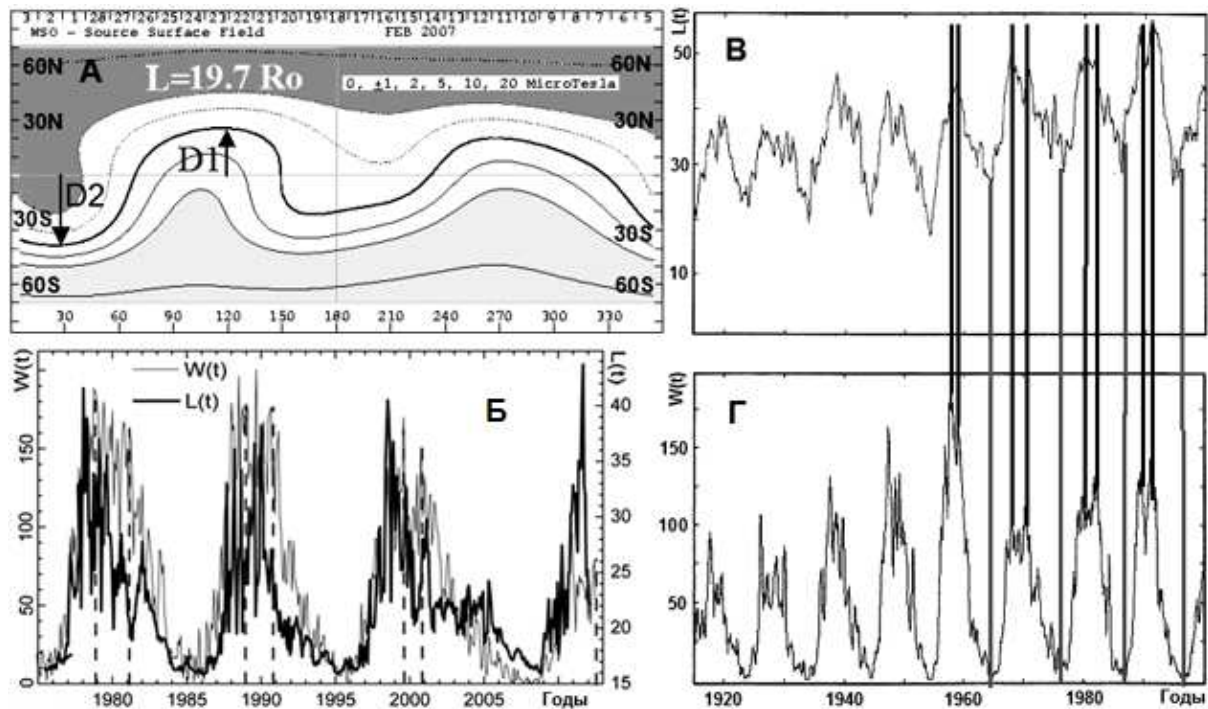


Рис. 1. (А) – Иллюстрация нейтральной линии (НЛ) на поверхности источника (толстая черная линия), максимальных отклонений НЛ от плоскости солнечного экватора D1 и D2. Приведено также значение длины нейтральной линии L. (Б) – сравнение циклических вариаций длины НЛ L(t) (толстая черная линия) и чисел Вольфа W(t) (серая линия), усредненных за месяц. Черными вертикальными линиями отмечены максимумы пиков W(t). (В) – циклические изменения длины нейтральной линии на поверхности Солнца (рис. 2 из Макаров, Тлатов, 2000а). (Г) – сглаженные по быстрым вариациям числа Вольфа в зависимости от времени (рис. 3 из Макаров, Тлатов, 2000а). Черные вертикальные линии проведены через максимумы W(t) для сравнения с расположением максимумов длины нейтральной линии. Серые вертикальные линии проходят через минимумы W(t) для сравнения с расположением минимумов длины нейтральной линии

3 Результаты

3.1 Сравнение циклических вариаций длины и максимального отклонения от плоскости солнечного экватора нейтральной линии на поверхности источника, а также коэффициентов разложения потенциала магнитного поля с временным ходом чисел Вольфа

На рис. 1 (Б) показаны циклические вариации длины нейтральной линии L(t) и W(t), и, для сравнения, на рис. 1(В) – изменения длины нейтральной линии на поверхности Солнца из работы (Макаров, Тлатов, 2000а). Видно, что характер изменения L(t) и W(t) существенно различается. L(t) достигает максимума для каждого из пары пиков W(t) в 11-летнем цикле активности (кроме 2-го пика в 23 цикле) примерно на 1–1.5 года раньше максимума чисел Вольфа. Временные профили L(t) на полувысоте заметно уже профилей W(t). Обращает на себя особенность в поведении L(t) на спаде 23 цикла. Примерно с середины 2002 г. до середины 2006 г. длина нейтральной линии в среднем не меняется (образуется плато), хотя подвержена быстрым колебаниям. Возможно, что небольшой участок такого поведения длительностью ≈ 1.5 года наблюдался и в 22 цикле активности. Можно высказать предположение, что такой длительный период (4 года) аномального поведения L(t)

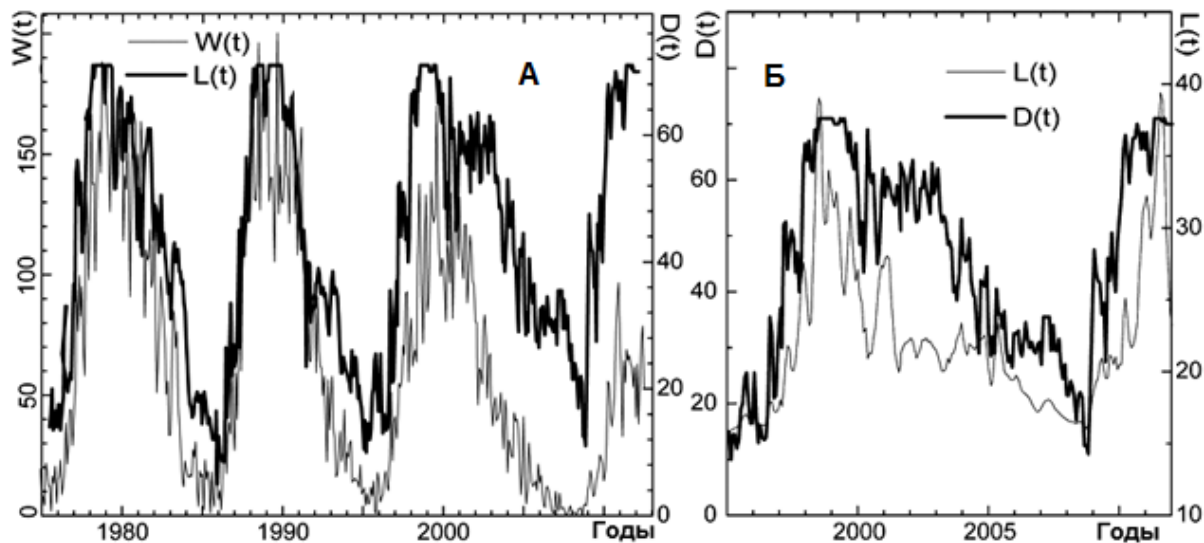


Рис. 2. (А) – сравнение циклических изменений чисел Вольфа (черная линия) и максимальных отклонений НЛ от плоскости экватора $D(t)$ (серая линия). (Б) – сопоставление временного хода в 23 и 24 циклах $L(t)$ (черная линия) и $D(t)$

отражает “подготовку” Солнца к последующему затянувшемуся во времени минимуму. В то же время, поведение длины НЛ на поверхности Солнца в 11-летнем цикле активности, как следует из работы (Макаров, Тлатов, 2000а), существенно отличается от поведения $L(t)$. Временная полуширина изменения со временем длины нейтральной линии на поверхности Солнца близка к полуширине $W(t)$, а все максимумы отдельных пиков $W(t)$ совпадают с максимумами длины НЛ на поверхности Солнца.

Из рис. 2 (А) следует, что для 21 и 22 циклов активности характер изменения $D(t)$ и $W(t)$ близки, хотя полуширина $D(t)$ примерно на 2 года больше, чем полуширина $W(t)$. Ситуация радикально изменилась в 23 и 24 циклах. В 23 цикле полуширина $D(t)$ стала примерно в 2 раза больше полуширины $W(t)$, на профиле максимального отклонения НЛ от экватора появилось плато, похожее на плато на профиле длины НЛ. Еще одна особенность зависимости $D(t)$ – резкий спад после завершения области плато. Из рис. 2 видно, что плато на профиле $D(t)$ начинается примерно во время окончания плато на зависимости $L(t)$. Но, тем не менее, часть времени существования плато на зависимости $D(t)$ (в 2005 и 2006 гг.) предшествовала началу затянувшегося минимума на профиле $W(t)$. И в этом случае мы можем отнести формирование плато на профиле $D(t)$ как проявление “подготовки” Солнца к затянувшемуся минимуму. Другими словами, в 23 цикле внутри Солнца происходили различные “нестандартные” события, выражающиеся, в том числе, и в появлении продолжительных плато на профилях $L(t)$ и $D(t)$, что предопределило появление продолжительного минимума.

Заметим, что небольшие периоды с плато на профилях $D(t)$ видны и в 21, 22 циклах, причем длительность плато нарастала с ≈ 1 года в 21 цикле до ≈ 3 лет в 23 цикле. Возможно, что длительность такого плато как на профилях $L(t)$, так и $D(t)$, отражает характер процессов перестройки магнитного поля внутри Солнца и может использоваться, как предиктор силы следующего цикла: чем больше длительность плато, тем менее мощным будет следующий цикл.

Из рис. 3. следует, что коэффициенты разложения потенциала поля по сферическим гармоникам для 3-х рассмотренных гармоник подвержены циклическим изменениям, но характер этих изменений для каждой гармоники разный. Квадрупольная компонента практически отсутствует в течение

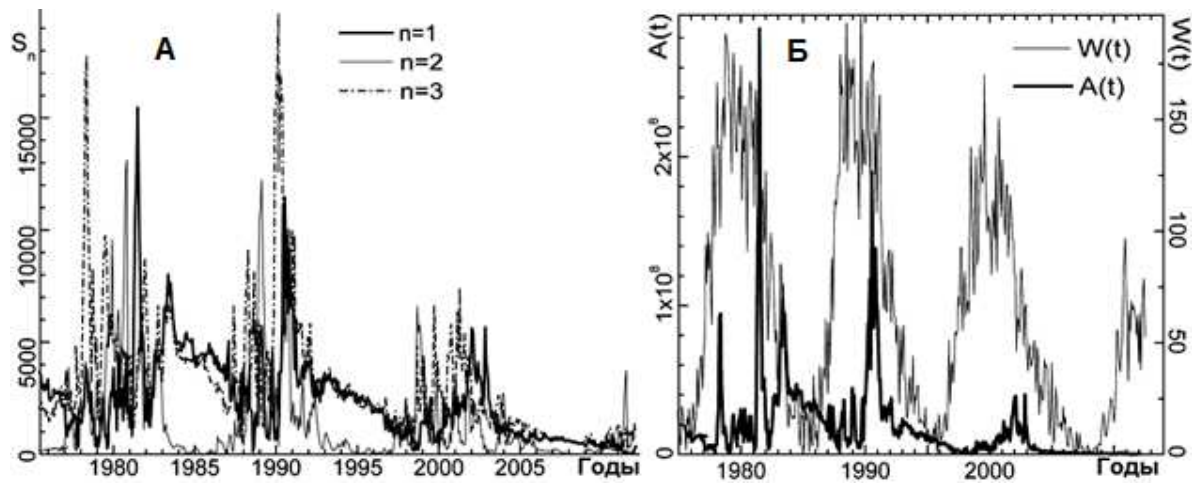


Рис. 3. (А) – сравнение суммы квадратов коэффициентов разложения потенциала поля по сферическим гармоникам для $n = 1$ (дипольная компонента крупномасштабного магнитного поля), $n = 2$ (квадрупольная компонента крупномасштабного магнитного поля), $n = 3$ (октупольная компонента крупномасштабного магнитного поля) в 21, 22, 23 и на ветви роста 24 циклах солнечной активности. (Б) – сравнение изменения со временем индекса $A(t)$, введенного в работе (Макаров, Тлатов, 2000b), с $W(t)$. $A(t) = S_1 + S_3/3^2$

длительных периодов в окрестности всех рассмотренных минимумов. В то же время дипольная и октупольная компоненты близки и заметны в этих окрестностях минимумов. Обращает на себя внимание, что примерно в течение того же промежутка времени, что и для длины нейтральной линии, на временной зависимости октупольной компоненты формируется плато, аналогичное плато на зависимости $L(t)$. Неожиданным оказалось соответствие между $A(t)$ и $W(t)$ (рис. 3 (Б)). В отличие от работы (Макаров, Тлатов, 2000b), где циклы $A(t)$ опережали циклы $W(t)$ на ≈ 5.5 лет, в нашем случае циклы $A(t)$ отстают от циклов $W(t)$ на 1–4 г. Причина такого различия пока остается неясной.

Поведение как трех гармоник на рис. 3 (А), так и суммы всех гармоник вплоть до 9-й (не показано), свидетельствуют об уменьшении солнечного магнитного поля в 23 цикле активности по сравнению с 21 и 22 циклами, и особенно – в 24 цикле.

3.2 Сравнительный анализ циклических изменений числа геомагнитных бурь и корональных выбросов массы, а также чисел Вольфа и характеристик крупномасштабного магнитного поля

Из рис. 4 (А) следует, что временные изменения $N_{CME}(t)$ и $W(t)$ близки на фазе роста и в максимуме 23 цикла и существенно различаются, начиная с середины спада активности вплоть до окончания минимума и начала роста интенсивности следующего, 24 цикла. Обращает на себя внимание появление на зависимости $N_{CME}(t)$ “квазиплато” – области в среднем слабо нарастающего числа КВМ на фоне его сильных колебаний. Характер изменения числа КВМ в области “квазиплато”, последующего резкого уменьшения $N_{CME}(t)$ и роста в начале 24 цикла качественно согласуется с изменением $L(t)$ и $D(t)$ в этот период. В то же время резкий спад $L(t)$ начинается раньше, чем такой же спад $N_{CME}(t)$, а плато на зависимости $D(t)$ начинается позже, чем “квазиплато” на $N_{CME}(t)$. Полученные результаты свидетельствуют о плохой корреляции между изменением пятенной активности Солнца и вариациями числа КВМ на фазе спада активности в 23 цикле и последующего протяженного минимума активности, и, одновременно, более сильной оказалась корреляция между $N_{CME}(t)$ с одной стороны и $L(t)$ и $D(t)$ – с другой. Эти результаты кажутся удивительными, т. к.

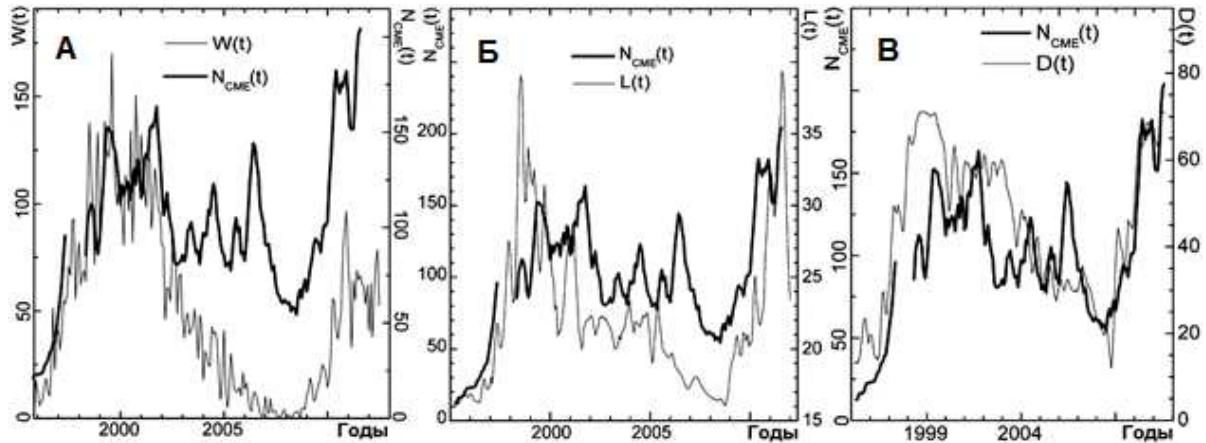


Рис. 4. (А) – вариации чисел Вольфа (серая линия) $W(t)$ и числа зарегистрированных КВМ (черная линия) $N_{CME}(t)$ в 23 цикле активности. (Б) – сравнение вариаций $N_{CME}(t)$ и $L(t)$ (серая линия) для 23 цикла. (В) – сопоставление для этого же цикла $N_{CME}(t)$ и $D(t)$ (серая линия)

большинство КВМ возникают как мелкомасштабные структуры в нижней короне и, казалось бы, число их появлений должно было бы лучше коррелировать с пятенной активностью Солнца (числами Вольфа), чем с изменениями со временем параметров крупномасштабного поля на расстоянии $2.5R_{\odot}$.

На рис. 5 для 23 и 24 циклов сопоставлено суммарное число N_{SSC} зарегистрированных внезапных начал геомагнитных бурь (SSC) и число внезапных импульсов (SI) N_{SI} с числом N_{HCME} КВМ типа гало (ГКВМ) – (А), с суммарным числом N_{HCME} и КВМ типа “полугало” (N_{PHCME}) – (Б), и с числом ГКВМ и КВМ типа “полугало” ($N_{HCME} + N_{PHCME}$) с линейной скоростью в поле зрения коронографов $SOHO/LASCO V > 700 \text{ km/s}$ ($(N_{HCME} + N_{PHCME})V > 700$) – (В). Отбор КВМ с большой скоростью обусловлен тем, что большинство таких КВМ на расстоянии $R > 15R_{\odot}$ по наблюдениям в поле зрения коронографа LASCO C3 сопровождается ударными волнами и, предположительно, такие выбросы массы с большой вероятностью будут сопровождаться ударной волной на орбите Земли, а значит, могут привести к возникновению SSC и SI. Видно, что наиболее сильное расхождение между $N_{SSC} + N_{SI}$ с одной стороны и N_{HCME} , $N_{HCME} + N_{PHCME}$ и $(N_{HCME} + N_{PHCME})_{V>700}$ – с другой стороны существует в минимуме активности между 23 и 24 циклами. ГКВМ и КВМ типа “полугало” не могут обеспечить все наблюдаемые SSC и SI. Это означает, что в минимуме активности значительная часть пришедших на орбиту Земли межпланетных ударных волн может быть связана с КВМ, не являющимися ГКВМ и КВМ типа “полугало”. Это могут быть наблюдавшиеся лимбовые КВМ, или КВМ с источниками, расположенными относительно недалеко от центра солнечного диска, но с маленькими угловыми размерами, вследствие чего они не были зарегистрированы в поле зрения коронографов.

Рис. 6 (А) свидетельствует о неплохой корреляции между длиной нейтральной линии и суммарным за месяц числом SSC и SI. Корреляция заметно нарушается в середине 2006 г., когда число ГКВМ и КВМ типа “полугало” резко уменьшается, а $L(t)$ уменьшается до минимального значения относительно плавно. Из рис. 6 (Б) следует, что существует удовлетворительная корреляция между усредненным за оборот Солнца $Kp(t)$ и $D(t)$ в 23 цикле.

В 23 цикле более детально были сопоставлены изменения со временем полного числа зарегистрированных за месяц бурь $N_{storm}(t)$ с вариациями длины нейтральной линии $L(t)$ и отклонение ее от плоскости экватора $D(t)$, а также с изменениями чисел Вольфа (иллюстрация не приводится). Это сопоставление показало следующее: (1) на спаде 23 цикла и в последующем минимуме актив-

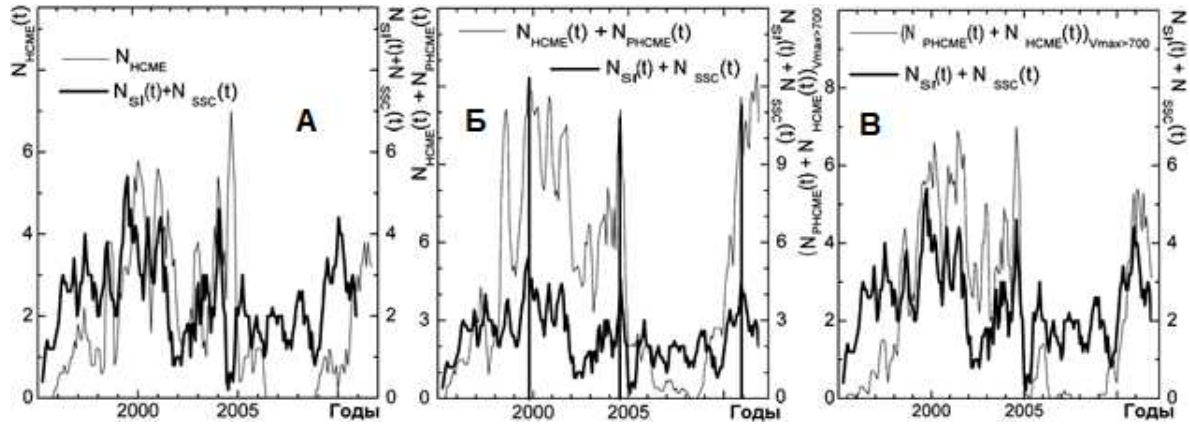


Рис. 5. (А) – для 23 и 24 циклов сопоставлено суммарное число N_{SSC} зарегистрированных внезапных начал геомагнитных бурь (SSC) и число внезапных импульсов (SI) N_{SI} с числом N_{HCME} КВМ типа гало (ГКВМ). (Б) – с суммарным числом N_{HCME} и КВМ типа “полугало” (N_{PHCME}). (В) – с числом ГКВМ и КВМ типа “полугало” ($N_{HCME} + N_{PHCME}$) с линейной скоростью в поле зрения коронографов SOHO/LASCO $V > 700$ км/с ($(N_{HCME} + N_{PHCME})_{V>700}$)

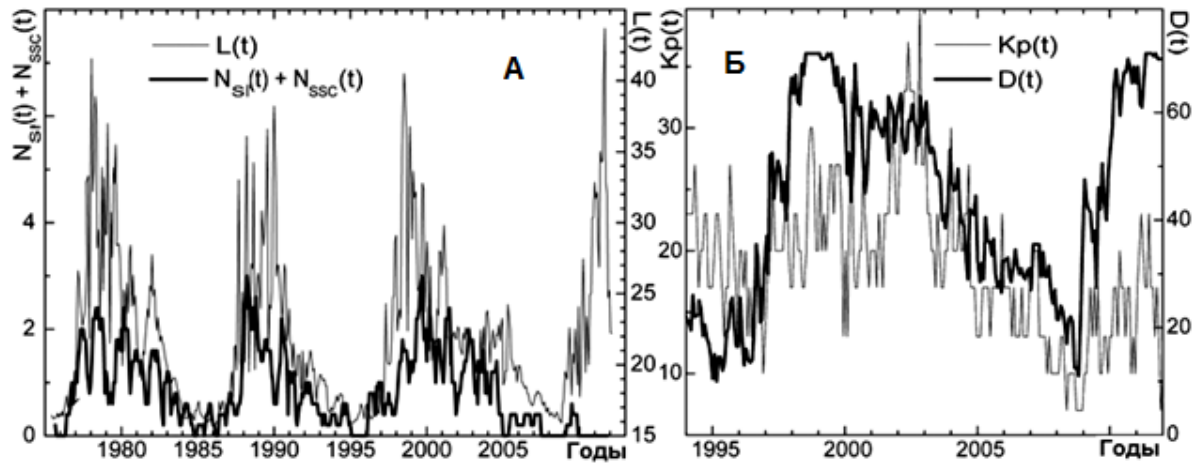


Рис. 6. (А) – связь $L(t)$ с $N_{SSC}(t) + N_{SI}$; (Б) – сопоставление изменения $D(t)$ в 23 цикле (примерно по ноябрь 2009 г.) усредненного по 27 дням Кр-индекса (умноженного на 10) и $D(t)$

ности относительное число бурь заметно превышает относительное число пятен. Это, по-видимому, отражает тот факт, что значительное число слабых и средних по интенсивности бурь связано с воздействием на магнитосферу Земли особых участков квазистационарного солнечного ветра, тесно связанных с быстрыми потоками ветра из корональных дыр; (2) начиная с середины 2004 г. и до момента, когда $N_{storm}(t)$ становится минимальным, число бурь неплохо коррелирует с $L(t)$ и $D(t)$. Кроме этого, $D(t)$ коррелирует с $N_{storm}(t)$ на фазе роста интенсивности бурь вплоть до фазы максимума. Все рассмотренные корреляции сильно нарушаются в период примерно с середины 2002 г. до середины 2004 г., когда число бурь резко возрастает, а на $W(t)$, $L(t)$ и $D(t)$ такого возрастания не наблюдается.

4 Выводы

Характер циклических вариаций длины $L(t)$ нейтральной линии (НЛ) магнитного поля на поверхности источника с одной стороны и чисел Вольфа $W(t)$ с другой стороны существенно различается. $L(t)$ достигает максимального значения на ≈ 0.5 –1.5 года раньше, чем максимум каждого из двух пиков на распределении $W(t)$ для 21–23 циклов солнечной активности. Полуширина распределений $L(t)$ в 21–23 циклах почти в 2 раза меньше полуширины $W(t)$. Такое изменение $L(t)$ существенно отличается от изменения со временем длины нейтральной линии на поверхности Солнца. В 23 цикле на профиле $L(t)$ образуется плато длительностью ≈ 4 года, когда $L(t)$ в среднем слабо меняется со временем на фоне колебаний длины НЛ. Окончание этого плато предшествует началу продолжительного минимума между 23 и 24 циклами.

Изменение со временем максимального отклонения НЛ от плоскости экватора $D(t)$ сравнительно неплохо согласуется с изменением со временем $W(t)$ в 21 и 22 циклах и существенно отличается в 23 и 24 циклах активности. В 23 цикле $D(t)$ становится примерно в 2 раза шире на полувысоте и на временном профиле $D(t)$ появляется плато длительностью ≈ 3 года, начинающееся и завершающееся позже начала и окончания плато на $L(t)$.

Показано, что коэффициенты разложения потенциала поля по сферическим функциям для 3-х рассмотренных гармоник подвержены циклическим изменениям, но характер этих изменений для каждой гармоники разный. Квадрупольная компонента практически отсутствует в течение длительных периодов в окрестности всех рассмотренных минимумов. В то же время дипольная и октупольная компоненты магнитного поля практически совпадают в окрестностях минимумов солнечной активности. Установлено, что примерно в течение того же промежутка времени, что и для длины нейтральной линии, на временной зависимости октупольной компоненты формируется плато, аналогичное плато на зависимости $L(t)$.

Высказано предположение, что обнаруженные особенности в поведении характеристик крупномасштабного поля во время 23 цикла могут отражать “подготовку” Солнца к затяжному минимуму солнечной активности между 23 и 24 циклами и, возможно, к относительно слабому 24 циклу активности.

Показано, что в 23 цикле активности временной ход $D(t)$ коррелирует с изменением усредненного за 27 дней Кр-индекса.

В отличие от “пятенной” активности, в 23 цикле были обнаружены особенности в изменении со временем числа N_{CME} зарегистрированных в течение месяца КВМ перед началом и в период затянувшегося минимума активности. Характер изменения $N_{CME}(t)$ качественно согласуется с временным ходом $D(t)$.

Установлено, что в затянувшемся минимуме между 23–24 циклами число зарегистрированных SSC и SI существенно превышает число всех ГКВМ и “полугало” КВМ, наблюдавшихся в это время. Сделан вывод, что в этом периоде активности существенную роль в генерации возмущений магнитосферы типа SSC и SI играют лимбовые КВМ и, возможно, незарегистрированные КВМ с маленькими угловыми размерами, возникающие вблизи центра солнечного диска.

Литература

- Альтшулер и др. (Altschuler M.D., Levine R.H., Stix M., Harvey J.) // Solar Physics. 1977. V. 51. P. 345.
- Ванг, Шили (Wang Y.-M., Sheeley N.R.) // Astrophys. J. 1990. V. 355. P. 726.
- Гопалсвами и др. (Gopalswamy N., Yashiro S. and Akiyama S.J.) // J. Geophys. Research. 2007. V. 112. A06112. doi:10.1029/2006JA012149.
- КАТАЛОГ геомагнитных бурь. Магнитные бури за 1950–2010 гг./ Ред. Канониди Х.Д. Препринт Академии наук СССР ИЗМИРАН. Троицк. 2011.
- Макаров В.И., Тлатов А.Г. // Астрон. журн. 2000а. Т. 77. С. 858.
- Макаров и др. (Makarov V.I. et al.) // Obs. Bull. 1986. V. 7. P. 2.
- Макаров, Тлатов (Makarov V.I., Tlatov A.G.) // Proc. SOHO 10/GONG Workshop-2000. Santa Cruz de Tenerife. Tenerife. Spain. 2-6 October 2000 (ESA SP-464, January 2001). 2000b. P. 111.
- Михайлуца В.П. // Астрон. журн. 1993. Т. 70. С. 543.
- Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 2. С. 157.