

## Особенности динамики магнитосферы в цикле солнечной активности

О.Д. Зотов<sup>(1)</sup>, Б.И. Клайн<sup>(1)</sup>, Н.А. Куражковская<sup>(1)</sup>

1 - Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН (ГО «Борок»), 152742 Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, 84854724763, ozotov@inbox.ru, 84854724763, klb314@mail.ru, 84854724763, knady@borok.yar.ru

### Аннотация.

Представлены результаты поиска параметров межпланетной среды, ответственных за обнаруженный нами эффект триггерного поведения активности магнитосферы, заключающийся в резком переходе от “периодического” режима к “хаотическому”. Показано, что изменение спектральных характеристик Ар-индекса в цикле солнечной активности коррелирует с динамикой параметра солнечного ветра  $\beta$  (отношение плазменного давления к магнитному). При  $\beta \sim 1$  в магнитосфере наблюдается “хаотический” режим, при  $\beta > 1$  “периодический”. Предполагается, что глобальным геоэффективным параметром, определяющим триггерный режим активности магнитосферы, является угол наклона оси магнитного диполя Солнца к плоскости эклиптики, от которого зависит изменение параметра  $\beta$  в цикле солнечной активности.

**Ключевые слова:** магнитосфера, солнечно - земные связи, триггерный режим, плазменное давление, магнитное давление

### Введение

Ранее нами в работе [1] на основе спектрального анализа Ар-индекса было показано, что в каждом из 11-летних циклов солнечной активности возмущенность магнитосферы характеризуется резкими переходами между двумя динамическими состояниями. Первое состояние, названное нами “периодическим” режимом, представляет собой слабый широкополосный шум с наличием 27-дневной периодичности и ее нескольких гармоник. Для второго состояния магнитосферы характерен сильный широкополосный шум и отсутствие 27-дневной периодичности. Этот режим мы назвали “хаотическим”. Поскольку термины “периодический” и “хаотический” достаточно условны, далее будем использовать их без кавычек. Обнаруженные резкие переходы магнитосферы от одного состояния к другому были названы нами триггерным режимом динамики магнитосферы [1].

Рис. 1 иллюстрирует чередование периодического и хаотического режимов в динамическом спектре Ар-индекса и, следовательно, в динамике магнитосферы. На временной оси периодический и хаотический режимы обозначены зелеными и красными прямоугольниками, соответственно.

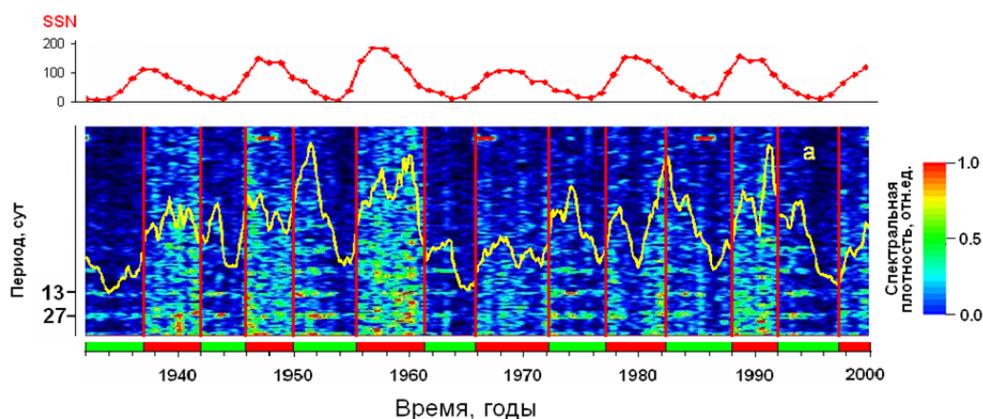


Рис. 1. - Среднегодовая динамика числа солнечных пятен - SSN (красная кривая) и Ар-индекса (желтая кривая), а - динамический спектр Ар-индекса.

Известно, (см., например, [2]) что глобальная геомагнитная активность имеет два максимума, которые связаны с максимумами 11-летнего цикла солнечной активности. Первый максимум геомагнитных возмущений наблюдается за 8-12 месяцев до максимума солнечной активности, второй - через 2-3 года после. Причем, если первый максимум в усредненной динамике Ар-индекса связывается с транзитной (спорадической) солнечной активностью, то второй - с рекуррентной солнечной активностью, которая и определяется 27-дневным периодом вращения Солнца.

Действительно, в каждом из 11-летних циклов динамика Ар-индекса демонстрирует хаотическое и периодическое поведение. Но переход от хаотического режима к периодическому режиму и наоборот достаточно резок. Как отмечалось выше, наблюдается триггерное переключение магнитосферы из одного динамического состояния в другое (см. рис.1 и комментарий к нему). В связи с этим закономерно возникает ряд вопросов. Почему наблюдается триггерный эффект (режим переключения) от хаотического к периодическому режиму в динамике Ар-индекса? Найдется ли в системе Солнце-Земля параметр, динамика которого совпадала бы с динамикой Ар-индекса? Существует ли физический агент (внешняя сила), который является определяющим для формирования эффекта переключения режима в динамике магнитосферы? Чем определяется триггерный режим - процессами на Солнце или в солнечном ветре?

Данная работа продолжает наши предыдущие исследования особенностей динамики земной магнитосферы с целью поиска параметров солнечной активности и/или межпланетной среды, которые управляют переключением режимов в динамике магнитосферы.

### **Исходные данные**

Для анализа были использованы ряды солнечной активности - суточных значений чисел Вольфа (SSN - Sun Spot Numbers, [www.wdcb.ru](http://www.wdcb.ru)), магнитосферной активности – (суточные значения Ар-индекса, [www.wdcb.ru](http://www.wdcb.ru)) за период с 1932 по 2016 гг., а также суточные данные о параметрах межпланетной среды (каталог OMNI, <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/omniweb>) за период с 1964 по 2016 гг. Кроме того, в работе использованы динамические спектры радиоизлучения Солнца, общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды [3], северо-южной асимметрии солнечной активности [4], широтного распределения центров пятнообразования (Закон Шпёрера и его графическое воплощение - “бабочки” Маундера, <https://ru.wikipedia.org>).

### **Результаты анализа**

Рассмотрим результаты поиска физического агента (внешней силы), который является определяющим для формирования эффекта переключения режима в динамике магнитосферы.

На рис. 2 показаны циклическая вариация числа солнечных пятен (SSN) и их динамический спектр. Видно, что на протяжении шести 11-летних солнечных циклов наблюдается только фундаментальная гармоника с периодом  $T = 27$  дней, которая имеет максимальную интенсивность в максимуме солнечной активности.

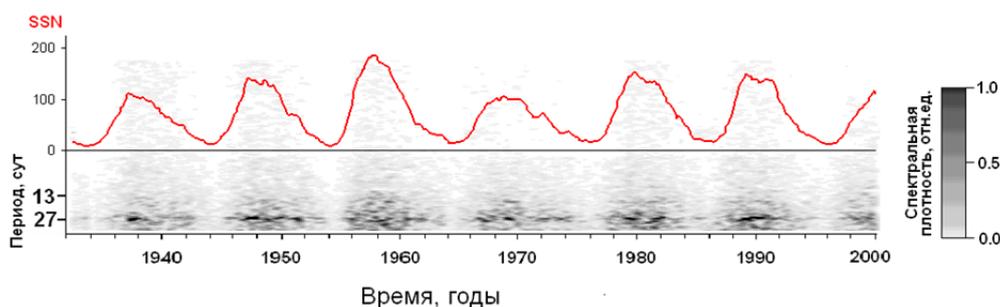


Рис. 2. - Циклическая вариация числа солнечных пятен (SSN) (красная кривая) и их динамический спектр.

Из сопоставления рис. 1 и 2 следует, что магнитосфера находится в хаотическом режиме (сильный широкополосный шум и отсутствие 27-дневной периодичности), когда в динамике SSN наблюдается максимальная интенсивность гармоник с периодом  $T = 27$  дней, и в периодическом режиме (слабый широкополосный шум, наличие 27-дневной периодичности и нескольких ее гармоник), когда в динамике SSN наблюдается минимальная интенсивность или полное отсутствие 27-дневной периодичности. Таким образом, сравнение динамических спектров SSN и Ар-индекса (см. рис. 1, 2) позволяет сделать вывод, что режим переключения динамики Ар-индекса не определяется динамикой числа солнечных пятен.

Аналогичным образом были выполнены сравнения динамического спектра Ар-индекса с динамическими спектрами радиоизлучения Солнца, общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды, северо-южной асимметрии солнечной активности, широтного распределения центров пятнообразования, которые показали, что рассмотренные характеристики Солнца не определяют режим переключения динамики Ар-индекса.

Далее, используя базу данных OMNI, были проанализированы динамические спектры практически всех основных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП): температуры и плотности протонов, динамического давления и скорости потока солнечного ветра, электрического поля,  $V_x$ -,  $V_y$ - и  $V_z$ - компонент ММП, параметра  $\beta$ , характеризующего отношение плазменного давления к магнитному ( $\beta = Np kT / (B^2 / 8\pi)$ ), где  $Np$  – плотность протонов,  $T$  – температура протонов,  $B$  – величина магнитного поля).

Сравнительный анализ динамических спектров параметров межпланетной среды и Ар-индекса показал, что в динамике всех исследованных параметров солнечного ветра и ММП, за исключением параметра  $\beta$ , не наблюдается смены динамических режимов, аналогично триггерному режиму в поведении Ар-индекса.

Мы не будем приводить динамические спектры всех анализируемых параметров солнечного ветра и ММП и представим в качестве примера для сравнения динамический спектр  $V_x$ -компоненты ММП и Ар-индекса (рис. 3). Из рис. 3 видны принципиальные различия в динамических спектрах  $V_x$ -компоненты ММП и Ар-индекса. А именно, для динамического спектра  $V_x$ -компоненты ММП характерен периодический режим на всем исследованном интервале в отличие от Ар-индекса, для динамики которого присущи резкие переходы от периодического к хаотическому режиму.

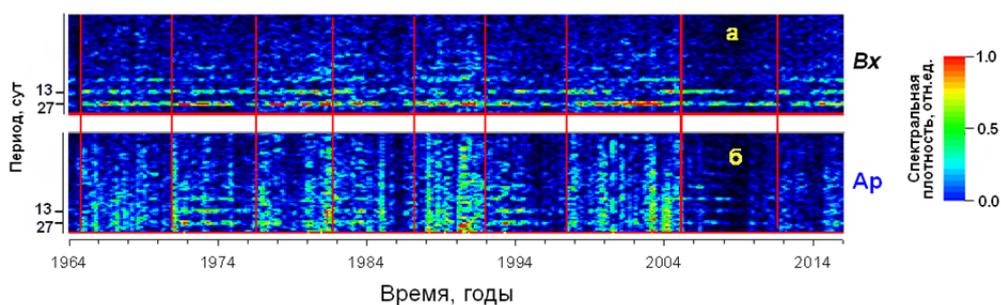


Рис. 3. - Динамические спектры  $Vx$ -компоненты ММП (а) и  $Ap$ -индекса (б).

На рис. 4 представлены динамические спектры параметра  $\beta$  и  $Ap$ -индекса. Видно, некоторое подобие этих спектров, а именно, для динамики параметра  $\beta$  характерны резкие переходы в хаотическом режиме, причем время переходов совпадает со сменой режима в  $Ap$ -индексе.

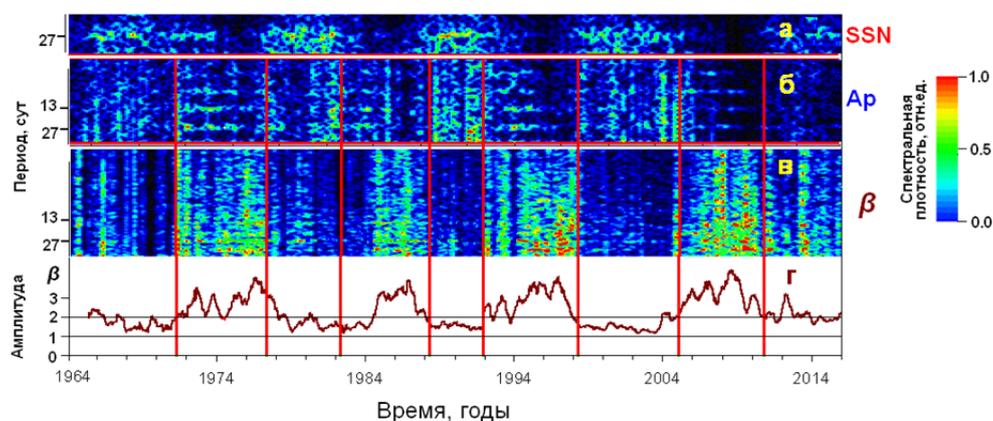


Рис. 4. - Динамические спектры SSN (а),  $Ap$ -индекса (б) и параметра  $\beta$  (в); среднегодовая динамика параметра  $\beta$  (г).

На этом же рисунке приведена среднегодовая вариация параметра  $\beta$ . Ее сопоставление с динамическим спектром  $Ap$ -индекса свидетельствует о том, что хаотический и периодический режимы в динамике магнитосферы наблюдаются при  $\beta \sim 1$  и при  $\beta > 1$ , соответственно.

Обратим внимание еще на одну особенность поведения  $Ap$ -индекса. На рис. 5 приведена зависимость  $Ap$ -индекса от параметра  $\beta$ . Видно, что максимум  $Ap$ -индекса достигается при значениях  $\beta \sim 1$ . При  $\beta > 1$  или  $\beta < 1$ , как следует из рис. 5, величина  $Ap$ -индекса в среднем стремится к нулю.

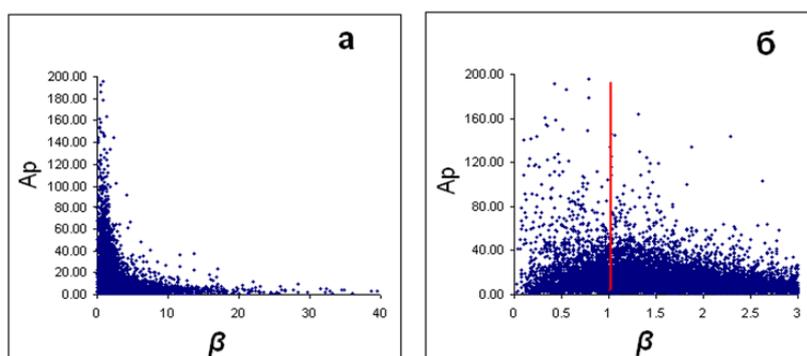


Рис. 5. - Зависимость  $Ap$ -индекса от параметра  $\beta$  (а), подробнее в диапазоне  $\beta \sim 1$  (б).

В связи с вышеизложенным, можно предположить, что параметра  $\beta$  является ответственным за смену режимов магнитосферной активности.

### Обсуждение

В настоящей работе мы предприняли попытку поиска факторов на Солнце, в солнечном ветре, в межпланетном пространстве, способствующих формированию триггерного режима в динамике магнитосферы. В результате спектрального анализа большого массива различных данных было показано, что наиболее вероятным параметром, ответственным за резкие переходы в активности магнитосферы от периодического к хаотическому режиму, может быть параметр солнечного ветра  $\beta$ . В свою очередь, сопоставляя динамику  $\beta$  и поведение угла наклона оси магнитного диполя Солнца  $\theta$  из работы [3], мы обнаружили, что значение параметра  $\beta$  близко к единице, когда величина угла  $\theta$  достаточно мала и изменяется в пределах  $\sim 0-30^\circ$ . Подтверждением последнего является рис. 6, на котором представлены циклические вариации угла  $\theta$ , числа солнечных пятен  $W$  [3], Ар-индекса, параметра  $\beta$  и динамический спектр Ар-индекса. Видно, что хаотические режимы в динамике Ар-индекса соответствуют интервалам времени, когда  $\beta \sim 1$  и  $\theta < 30^\circ$  (обозначено желтыми прямоугольниками).

С другой стороны, из распределения параметра  $\beta$  в окрестности Солнца, взятого из работы [7], следует, что на орбите Земли плазменное и магнитное давления будут сравнимы по величине ( $\beta \sim 1$ ) при углах наклона оси магнитного диполя близких к нулю. В правой части рис. 6 мы привели распределение параметра  $\beta$  в окрестности Солнца [7]. Таким образом, учитывая связь параметра  $\beta$  с динамикой Ар-индекса и зависимость  $\beta$  от угла  $\theta$  в цикле солнечной активности, можно предположить, что глобальным геоэффективным параметром, определяющим триггерные эффекты активности магнитосферы, является угол наклона оси магнитного диполя Солнца к плоскости эклиптики.

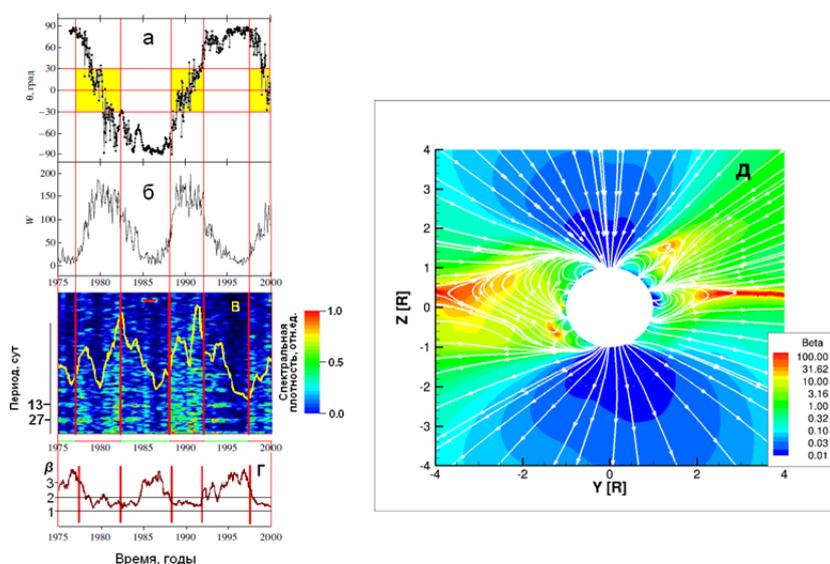


Рис. 6. - Угол  $\theta$  наклона оси магнитного диполя, измеренный от плоскости солнечного экватора (широта) [3] (а), среднемесячные значения чисел Вольфа [3] (б); динамический спектр Ар-индекса (в), среднегодовая динамика Ар-индекса (желтая кривая) (в) и параметра  $\beta$  (коричневая кривая)(г); параметр  $\beta$  и линии магнитного поля в плоскости  $X = 0$  от  $-4 R_\odot$  до  $4 R_\odot$  [7] (д).

Следует отметить, что от величины параметра  $\beta$  также существенно зависит уровень турбулентности в плазме солнечного ветра. Согласно [6] уровень турбулентности достигает максимума при  $\beta \sim 1$ . По нашему мнению, именно турбулентность солнечного ветра определяет уровень активности магнитосферы Земли.

Ранее [5] мы уже обращали внимание на то, что магнитосферу можно рассматривать как систему, находящуюся в метастабильном состоянии. Влияние внешнего шума на такую систему приводит к появлению случайных переключений между аттракторами системы. В результате геомагнитная активность будет определяться свойствами внешнего шума.

## Выводы

Результаты проведенного исследования показали, что изменение режима хаос - периодичность в динамике магнитосферы определяется величиной параметра  $\beta$ . Хаотические и периодические режимы в динамике магнитосферы наблюдаются при  $\beta \sim 1$  и при  $\beta > 1$ , соответственно. Следовательно, отношение давления плазмы к магнитному давлению является параметром, определяющим смену режима в динамике магнитосферы.

Изменение  $\beta$  в 11-летнем цикле солнечной активности определяется динамикой угла наклона оси магнитного диполя Солнца. Это позволило предположить, что глобальным геоэффективным параметром, определяющим особенности динамики активности магнитосферы, является угол наклона оси магнитного диполя Солнца к плоскости эклиптики.

## Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ 16-05-00056, Гос. темой 0144-2014-00116.

## Список литературы

1. Зотов О.Д., Клайн Б.И. Триггерный режим в динамике магнитосферы // *Триггерные эффекты в геосистемах* (Москва, 6–9 июня 2017 г.): материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М. ГЕОС. 2017. С. 442-449.
2. Webb D.F. et al., The Solar Sources of Geoeffective Structures // *Space Weather*, AGU Geophys. Monograph 125, 2001, 123 p.
3. Лившиц И.М., Обридко В.Н.. Изменения дипольного магнитного момента солнца в течение цикла активности // *Астрономический журнал*, 2006, Том 83, №11, С.1031–1041.
4. Бадалян О.Г., Обридко В.Н., Рыбак Я., Сикора Ю. Северо-южная асимметрия солнечной активности // *Солнце в эпоху смены знака магнитного поля*: Сб. трудов ГАО РАН. СПб., 2001, С. 33-40.
5. Zotov O.D., Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A. Stochastic resonance in the Earth's magnetosphere // *Proceedings of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos"*. (St. Petersburg, May 26-30, 2008). Ed. by V.N. Troyan, M. Hayakawa, V.S. Semenov. SPb., 2008. 505 p. ISBN 978-5-9651-0303-4. P. 360-363.
6. Чернышов А.А., Карельский К.В., Петросян А.С. Подсеточное моделирование для исследования сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы // *УФН*, 2014, 184 (5), С. 457-492.
7. Sokolov I. V., Bart van der Holst, Rona Oran et al. Magnetohydrodynamic waves and coronal heating: unifying empirical and MHD turbulence models // *The Astrophysical Journal*. 2013. V.764: 23. 13pp. doi:10.1088/0004-637X/764/1/23.