

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ  
И ЕЕ СВЯЗЬ С ВАРИАЦИЯМИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА ПРОТЯЖЕНИИ 22 И 23 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

В.А. Дергачев, П.Б. Дмитриев

SOFT X-RAY SOLAR ACTIVITY AND ITS CORRELATION WITH COSMIC RAY AND EARTH'S  
MAGNETIC FIELD VARIATIONS DURING 22nd AND 23rd SOLAR CYCLES

V.A. Dergachev, P.B. Dmitriev

Разработан метод объединения многочисленных разрозненных по времени однотипных рядов измерений в единый средневзвешенный ряд, определенный на промежутке времени, охватывающем все первоначальные измерения. На основе этого метода по данным измерений спутников серии GOES синтезированы ряды среднесуточных данных потока мягкого рентгеновского излучения Солнца и величины магнитного поля Земли на протяжении 22 и 23 циклов солнечной активности. Поток рентгеновского излучения был разделен на два компонента: «вспышечный» и «фоновый». Аналогичным методом на этом же интервале времени был синтезирован среднесуточный поток космических лучей по измерениям сети нейтронных мониторов, разбросанных по всей земной поверхности. В результате построения комбинированной спектральной периодограммы в вышеперечисленных средневзвешенных рядах данных обнаружены квазипериодические компоненты с периодами от нескольких дней до года для каждого из солнечных циклов в отдельности. Значения выявленных квазипериодов отражают средние времена жизни активных образований солнечной атмосферы и ее дифференциальное вращение. Исследованы функции взаимной корреляции вспышечного и фонового компонентов рентгеновского потока солнечного излучения с потоком космических лучей и величиной магнитного поля Земли.

The method has been developed for integrating numerous one-type series of measurements separated in time into the unified weight-average series defined at the interval enclosing all initial measurements. Diurnal averaged series was synthesized on the basis of this method using data of GOES satellites; the series comprises the flux of soft solar X-ray and the value of a terrestrial magnetic field during 22nd and 23rd solar activity cycles. The X-ray flux series was divided into «flare» and «background» components. The diurnal averaged series of the cosmic ray flux was also synthesized by the similar method from measurements of neutron monitors scattered over the Earth's surface. The construction of the complex spectral periodogram allowed us to reveal the hidden quasi-periodicities with periods from several days to one year for each of solar cycles in the above weight-average data series. The revealed periodicities show up the mean lifetime of solar activity features as well as differential rotation of the solar atmosphere. The functions of cross-correlation of flare and background components of the soft X-ray flux with the cosmic ray and Earth's magnetic field variations were also considered.

## Введение

Уже первые снимки Солнца в рентгеновских лучах («Skylab») показали, что мягкое рентгеновское излучение (МРИ) Солнца генерируется не фотосферой, а активными областями хромосферы и короны, состоящими из многочисленных петлеобразных структур в виде арок (магнитных трубок), основания которых уходят под фотосферу (солнечные пятна), а вершины расположены в короне. С одной стороны, эти магнитные петли наполнены более плотной, чем окружающая их среда, горячей плазмой, «квазитепловое» излучение которой дает медленно меняющуюся составляющую (назовем ее «фоновой») МРИ Солнца. С другой стороны, в этих структурах происходят солнечные вспышки, которые в МРИ проявляются как резкое увеличение потока излучения на несколько порядков по сравнению с фоновым и отличаются от него скоротечностью (минуты, часы). Поэтому МРИ может служить индикатором магнитной солнечной активности (СА) двояким образом: фоновая составляющая должна отражать интенсивность образования в атмосфере Солнца магнитных активных областей, а вспышечная – динамику их эволюции. Правомерность данного подхода к изучению СА была обоснована в [1], где было показано, что рентгеновский индекс СА, введенный на основе величины потока МРИ от полного диска Солнца, дает высокую степень корреляции ( $\approx 0.9$ ) с известными характеристиками СА, такими как числа Вольфа, по-

ток радиоизлучения на частоте 2800 МГц, вспышечный индекс и суммарная площадь солнечных пятен.

Со своей стороны, вариации потока космических лучей (КЛ), регистрируемых сетью нейтронных мониторов (НМ) на поверхности Земли, несут информацию о возмущении магнитного поля (МП) Земли потоком солнечного ветра и о самых мощных солнечных вспышках, во время которых ускоренные до релятивистских скоростей частицы, преодолевая межпланетное пространство, достигают Земли.

Только одновременное изучение данных по МРИ Солнца, КЛ и вариациям МП Земли дает возможность более полного анализа закономерностей развития СА и ее влияния на магнитосферу Земли.

## Исходные данные

Для изучения СА в рентгеновском диапазоне длин волн и ее влияния на магнитосферу Земли во время 22 (01.01.1986–31.03.1996) и 23 (01.04.1996–30.06.2007) циклов СА исследовались следующие данные (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>): 1) измеренные восемью спутниками серии GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellites) потоки МРИ ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) от всего диска Солнца в диапазоне 1–8 Å (1.6–12.4 кэВ) с временным разрешением один час и величины общего вектора МП (нТл) Земли с временным разрешением один день; 2) зарегистрированные сетью НМ (44 станции) потоки КЛ (счет/час) с временным разрешением один день.

### Методика обработки исходных данных

В архивах баз данных хранятся многочисленные серии однотипных результатов измерений разных физических явлений, которые в последнее время благодаря развитию Интернета стали доступными широкому кругу исследователей. Эти измерения проводились в разные промежутки времени, которые либо совпадают, либо не совпадают, либо частично перекрываются. Поэтому для изучения физических явлений на максимально возможных временных шкалах было бы целесообразно разработать метод объединения таких разрозненных измерений в единый синтезированный ряд, который сохранял бы физические характеристики этих измерений и охватывал весь интервал времени, в котором они проводились. Теоретическая основа такого метода давно существует – это принципы обработки неравноточных рядов измерений [2].

### Синтез средневзвешенного ряда измерений

По измерениям восьми спутников серии GOES (GOES-5 – GOES-12) средневзвешенные ряды потока МРИ и величины общего вектора МП Земли вычислялись следующим образом. На каждую дату общего промежутка времени функционирования всех восьми спутников, измерения каждого спутника, имеющиеся для этой даты, усредняются как неравноточный ряд измерений с заданными весами, значения которых для каждого спутника в отдельности определяются через вычисленные значения дисперсий рядов измерений этих спутников. Таким образом, на каждую дату из общего интервала времени всех исходных измерений спутников вычисляются одно значение средневзвешенного синтезированного ряда измерений и средняя квадратичная ошибка этого значения. Для потока МРИ средневзвешенный ряд был вычислен с часовым разрешением для последующего его разделения на среднесуточные фоновую и вспышечную составляющие. Для общего вектора МП Земли сразу был синтезирован среднесуточный единый ряд измерений.

Для потоков КЛ, зарегистрированных с помощью 44 НМ, вычисление среднесуточного синтезированного ряда измерений слегка отличается от выше описанной процедуры. Поскольку измерения различных НМ, даже скорректированные за счет атмосферного давления, расходятся в своих значениях почти на порядок, они сначала нормализуются для каждого НМ, т. е. приводятся к ряду с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. При этом вычисляются среднее значение всех математических ожиданий и среднее значение всех дисперсий рядов измерений сети НМ. Затем эти нормализованные ряды измерений по 44 НМ обрабатываются по вышеописанной схеме, как в случае измерений спутников серии GOES. И, наконец, вычисленный таким образом среднесуточный средневзвешенный ряд данных преобразовывается к ряду с математическим ожиданием и дисперсией, равными соответственно среднему математических ожиданий и среднему дисперсий всех рядов измерений НМ, – ряду как бы «возвращающимся» статистические свойства и физическая размерность, характерные для измерений всех НМ.

### Разделение МРИ на фоновую и вспышечную составляющие

Среднесуточные значения фоновой и вспышечной составляющих потока МРИ Солнца вычислялись по значениям средневзвешенного почасового ряда данных МРИ. Исходные почасовые данные для каждого суток усреднялись на шести часовых интервалах и из этих усредненных значений выбирались минимальные, которые и принимались за среднесуточные значения фоновой составляющей МРИ. Далее почасовой средневзвешенный ряд усреднялся по суткам и из его усредненных среднесуточных значений вычислялись значения среднесуточной фоновой составляющей. Таким образом, получались значения среднесуточной вспышечной составляющей потока МРИ Солнца.

### Выявление скрытых периодичностей

Выявление скрытых периодичностей в синтезированных среднесуточных рядах данных фоновой и вспышечной составляющих потока МРИ Солнца, общего вектора МП Земли и потока КЛ осуществляется при помощи комбинированной спектральной периодограммы (КСП), метод построения которой заключается в следующем.

За основу КСП берется выборочная оценка нормированной спектральной плотности, которая вычисляется в зависимости от пробного периода [3], а не от частоты [4]. Исходные временные ряды предварительно фильтруются при помощи высокочастотного фильтра [5] с заданной частотой среза. Для каждого отфильтрованного со своим конкретным значением частоты среза высокочастотного компонента снова вычисляется выборочная оценка нормированной спектральной плотности от периода и все эти оценки, вычисленные для различных значений частоты среза, накладываются друг на друга на одном и том же поле графика, образуя КСП. Значения скрытых периодичностей определяются по максимальным значениям полученной таким образом КСП. Достоверность выявленных периодов в этом методе состоит из достоверности расположения пиков на периодограмме и достоверности их величины. Первая из них определяется селективностью метода и величиной шага, заданного на КСП по оси пробных периодов. Вторая – обусловлена высокочастотной фильтрацией исходных данных, так как достоверность максимальных значений пиков на отдельных КСП отфильтрованных компонентов превышает уровень значимости  $(4\div 7)\sigma$ . Это значительно выше, чем для случая, когда КСП является случайному шумом с нормальным распределением.

### Обсуждение результатов

Значения выявленных квазипериодов в потоках фонового (ФРИ) и вспышечного (ВРИ) мягкого рентгеновского излучения Солнца, величине МП Земли и потоке КЛ в течение 22 цикла СА приведены в табл. 1, а в течение 23 – в табл. 2.

Таблица 1  
Значения выявленных квазипериодов, сут

ФРИ	ВРИ	МП	КЛ
9		7, 9	5, 10
14	14	12, 14, 16	
26, 29		20, 26	24, 26, 29
	32	30, 37	33, 37
49	43	44, 49	43
54	53, 58		53, 58
	65	61	65
75	73	70	73
	81	79, 83, 88	82
		100, 110	92, 104
	130	115, 121	118
160, 185	160	190	155
220	215		205
265, 360	275	280	265, 350
		1 год	1.3 года
2.25 года	1.9 года		2.2 года

Таблица 2  
Значения выявленных квазипериодов, сут

ФРИ	ВРИ	МП	КЛ
7	5	9	7
14, 18	18	14, 19	12
23, 29	23, 29	28	25, 30
37	35, 38	36	34, 38
45	45	44	45
53	52, 56	54	54
63, 67	62, 67	61, 69	60, 63, 67
73	73, 76	74, 76	72, 75, 78
86	86		85
94	95	91	96
112	112	114	119
134	135	121, 127	135
160	155	180	155
200, 265	220	260	215, 265
310	360		330
1 год		1 год	1.1 год
1.8 года	1.8 года		2.3 года

Из анализа этих значений можно сделать вывод, что квазипериоды, выявленные в данных МП Земли и потоке КЛ, скорее всего, определяются значениями квазипериодов СА, проявляющихся в фоновой и вспышечной составляющих МРИ, значения которых незначительно расходятся в 22 цикле по сравнению с 23. Исключение из этой закономерности составляет очень мощный квазипериодический компонент (9 дней) МП Земли в 23 цикле, который должен обусловливаться секторной структурой межпланетного магнитного поля, и мощнейший периодический компонент МП (1 год) в 22 и 23 циклах одновременно, который обусловлен движением Земли вокруг Солнца.

В свою очередь, значения квазипериодов, обнаруженных в потоке МРИ Солнца, могут быть интерпретированы следующими образом.

Периоды 24–25, 53–54, 72–73, 111–106 и 122–127 сут могут быть обусловлены сидерическим вращением Солнца в зависимости от широты места источников излучения, расположенных в хромосфере Солнца на высоте 5000–11000 км над уровнем фотосфера [6, 7] или в короне на высоте 40000–60000 км над фотосферой [8, 9].

С различными проявлениями СА [10] могут быть связаны и другие выявленные периоды, а именно: 6 сут – время жизни обычной группы пятен, 45 сут –

время жизни больших групп пятен, определяющих изменение СА, 11 сут – время изменения площади большого пятна в  $\pi$  раз, 15 сут – время жизни факельной площадки, 82 сут – время жизни больших групп факельных площадок, определяющих изменение СА, 43 сут – время, за которое наблюдаемая площадь факельного поля уменьшается в  $\pi$  раз, 58 сут – среднее время жизни спокойного протуберанца.

### Связь СА с вариациями МП Земли и КЛ

Для выяснения вопроса о существовании взаимосвязи между СА, проявляющейся в МРИ Солнца, возмущениями магнитосферы Земли и вариациями потока КЛ была выполнена оценка взаимной корреляционной функции (ВКФ) среднесуточных рядов ФРИ- и ВРИ- компонентов МРИ Солнца с потоком КЛ и величиной МП Земли. Также была проведена проверка гипотезы: полностью ли не коррелированы между собой соответствующие пары рядов, т. е. являются ли они белым шумом. Если гипотеза верна, то число вычисленных значений ВКФ этих пар рядов, превышающих уровень значимости 95 % ( $2\sigma$ ), должно составлять меньше 5 % от общего числа всех значений ВКФ. Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

	22 цикл		23 цикл	
	КЛ	МП	КЛ	МП
ФРИ	-0.745 -0.764 ( $4^d$ ) 89% >5%	-0.147 -0.170( $12^d$ ) 62% >5%	-0.600 -0.638 ( $4^d$ ) 82% >5%	0.004 0.010 ( $2^d$ ) 35% >5%
ВРИ	-0.263 -0.307 ( $4^d$ ) 65% >5%	0.038 0.056 ( $4^d$ ) 16% >5%	-0.237 -0.315 ( $3^d$ ) 59% >5%	0.008 0.047 ( $2^d$ ) 13% >5%
МП	-0.007 -0.013 ( $1^d$ ) 61% >5%		0.018 0.032 ( $4^d$ ) 40% >5%	

Структура данных, приведенных в каждой ячейке, несет определенный смысл. В качестве примера рассмотрим первую ячейку, где приведены данные ВКФ и проверки гипотезы для пары ФРИ и КЛ:

–0.745 – значение коэффициента взаимной корреляции ФРИ с потоком КЛ;

–0.764 ( $4^d$ ) – значение сериального коэффициента ( $-0.764$ ) в момент сдвига ( $4^d$ ), положительное значение которого означает, что вариации потока ФРИ опережают изменения потока КЛ;

89 % >5 % означает, что 89 % значений взаимной корреляционной функции превышают 95 %-й уровень значимости.

Из анализа результатов таблицы следует, что изменения в потоке ФРИ и ВРИ опережают изменения в вариациях МП и КЛ в среднем на 4 дня (это значение соответствует средней скорости солнечного ветра  $\approx 400$  км/с, измеренной на орбите Земли), находятся в противофазе с изменениями потока КЛ и в фазе с вариациями МП Земли, причем гипотеза о некоррелированности, т.е. о полном отсутствии связи в соответствующих парах рядов данных, неверна для всех пар.

Значения табл. 3 дают предельно ясную картину взаимодействия СА с вариациями магнитосферы Земли и потоком КЛ, регистрируемым на ее поверх-

ности: возмущения, порождаемые магнитной активностью Солнца, в виде плазменных потоков переносятся солнечным ветром и тем самым определяют состояние магнитосферы Земли и вариации потока КЛ, регистрируемого НМ.

### Выводы

1. В работе рассмотрен метод объединения разрозненных однотипных измерений в единый синтезированный ряд, который сохраняет основные средние статистические и физические характеристики первоначальных исходных измерений. Метод основан на принципе обработки неравноточных временных рядов с заданными весами измерений.

2. На основе измерений потока МРИ от всего диска Солнца в диапазоне 1–8 Å, величины общего вектора МП Земли восемью спутниками серии GOES и потока КЛ сетью НМ (44 станции), разбросанных по земной поверхности, синтезированы единые ряды данных за период 22 и 23 циклов СА с 1986 по 2007 г.

3. При помощи модифицированного метода спектрального анализа в синтезированных рядах данных выделены квазипериодические компоненты с периодами от нескольких дней до полутора лет, которые отражают характерные времена жизни солнечных активных образований 22 и 23 циклов.

4. На основе значений синтезированных рядов данных рассмотрена взаимосвязь СА в рентгеновском диапазоне длин волн и возмущений магнитосферы Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 06-04-48792, 06-02-16268, 06-05-64200, 07-02-00379), Президиума РАН (Программа «Изменения окружающей среды и климата»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев П.Б., Милецкий Е.В. // Сравнительный анализ вариаций потока мягкого рентгеновского излучения Солнца и других характеристик солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2002. Вып.2 (115). С. 16–17.
2. Агекян Т.А. Теория вероятностей для астрономов и физиков. М.: Наука, 1974. 264 с.
3. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
4. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Вып. 2. 287 с.
5. Alavi A.S., Jenkins G.M. An example of digital filtering // Appl. Statist. 1965. V. 14. P. 70–74.
6. Ternullo M. The rotation of calcium plages in the years 1967–1970 // Solar Phys. 1986. V. 105. P. 197–204.
7. Donahue R.A., Keil S.L. The solar surface differential rotation from disk-integrated chromospheric fluxes // Solar Phys. 1995. V. 159. P. 53–62.
8. Vats H.O., Cecatto J.R., Mehta M., et al. Discovery of variation in solar coronal rotation with altitude // Astrophys. J. 2001. V. 548. P. L87–L89.
9. Vats H.O., Deshpande M.R., Shah C.R., Menta M. Rotational modulation of microwave solar flux // Solar Phys.. 1998. V. 181. P. 351–362.
10. Allen C.W. Astrophysical quantities. London, Athbone Press. 1973.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург