

ПОИСК ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ, СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ И КОРОНАЛЬНОМ ИНДЕКСЕ ПЕРЕД ПРИХОДОМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ ОТ СОЛНЦА

© 2010 Х.А. Перес-Пераса¹, В.М. Веласко-Эррера¹, Х. Запотитла¹,
Л.И. Мирошниченко², Э.В. Вашенюк³

¹*Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Coyoacán, 04510, México*

²*Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Московская область, 142190, Россия. E-mail: leonty@izmiran.ru*

³*Учреждение Российской академии наук Полярный Геофизический институт РАН, Апатиты, Мурманская область, 184209, Россия*

Используя различные подходы и технические приёмы вэйвлет-анализа, мы исследуем вариации (осцилляции) галактических космических лучей (ГКЛ), числа солнечных пятен и коронального индекса (СІ) солнечной активности (СА) перед наземными возрастаниями (GLE) солнечных космических лучей (СКЛ). Полученные результаты обсуждаются в рамках современных представлений о периодических явлениях в фотосфере и короне Солнца, в межпланетной среде и космических лучах.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (СПС) регистрируются у орбиты Земли довольно часто и представляют собой одно из важнейших проявлений солнечной активности (СА) [1, 2]. До последнего времени их обычно рассматривали как случайный процесс, обусловленный в основном солнечными вспышками. Вместе с тем, их тесная связь с центрами солнечной активности, выбросами коронального вещества (СМЕ) и ударными волнами также не подлежит сомнению [2, 3]. Наконец, можно утверждать, что частота появления СПС до некоторой степени следует 11-летнему циклу солнечной активности [1, 4, 5].

Большинство СПС наблюдаются в нерелятивистской области энергий (от ≥ 10 МэВ до ≤ 500 МэВ для протонов). Осцилляции различных характеристик таких событий широко исследовались в прошлом [1, 4, 6]. При этом были выявлены многие периоды, присущие другим параметрам СА, в частности, периоды длиной около 5 месяцев и ~ 2 лет. В среднем 1 раз в год к Земле приходят релятивистские солнечные протоны с энергией от 500 МэВ

до ≥ 10 ГэВ. События такого типа получили название наземных возрастаний солнечных космических лучей (СКЛ), или Ground Level Enhancements (GLEs). Всего за период 1942-2006 гг. было зафиксировано 70 GLEs [2]. Широко известное событие 23 февраля 1956 г. (GLE05 в принятой ныне нумерации) до сих пор остаётся самым большим за всю историю наблюдений. Большинство событий GLE наблюдаются преимущественно на восходящем или нисходящем участке кривой 11-летнего цикла солнечных пятен, редко – в максимуме цикла и практически отсутствуют в периоды солнечных минимумов [1, 5]. При этом на фоне в целом квазипериодических вариаций оказываются возможными очень сильные флуктуации частоты появления отдельных GLE [1, 2, 4, 5].

Изучение характеристик СПС (и, в частности, GLE) даёт ценные сведения о свойствах источника, процессах ускорения и переноса ускоренных частиц, о фундаментальных свойствах Солнца как звезды [1, 2], например, о максимальных возможностях солнечного ускорителя (или ускорителей), о структуре и динамике магнитных полей в солнечной атмосфере, о магнитных параметрах межпланетной среды. С другой стороны [6], остаётся актуальной задача обеспечения радиационной безопасности для экипажей и электроники на борту космических аппаратов (КА), особенно при планировании и осуществлении межпланетных миссий. В связи с важностью отмеченных фундаментальных и прикладных проблем солнечно-земной физики, в настоящей работе с помощью современной техники вэйвлет-анализа [7] предпринята попытка исследовать поведение ряда космофизических параметров накануне GLE.

1. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Как отмечено в [8], магнитная активность Солнца часто отличается нелинейным, кратковременным и хаотическим поведением. По этой причине мы использовали методы вэйвлет-анализа [9-12], чтобы сравнить поведение индикаторов СА и космических лучей с математическими моделями. Для анализа отобраны четыре выдающихся события GLE: 23 февраля 1956 г. (GLE05), 14 июля 2000 г. (GLE59), 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января 2005 г. (GLE69) ([DataBase at World Data Center C, Japan](#); [DataBase at World Data Center B, Russia](#)). Прежде всего, была изучена эволюция спектра мощности флуктуаций ГКЛ за 50 дней до момента конкретного GLE. При этом для анализа события GLE05 использовались данные нейтронного монитора на горе Клаймакс (Канада), для трёх остальных GLE

анализировались данные станции Оулу (Финляндия). Чтобы найти особенности в поведении самих потоков СКЛ, пригодные в качестве прогностических признаков, мы анализировали данные наблюдений внутри временного интервала отдельных GLE. Далее когерентный вэйвлет-анализ был применён к среднесуточным значениям числа солнечных пятен (<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>) и к данным о корональном индексе CI (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/solintro.html>). Уровень значимости вэйвлет-спектра мощности оценивался с учётом недавних достижений в получении теоретических вэйвлет-спектров для процессов белого и красного шума [9]. Важно отметить, что мощность красного шума растёт с уменьшением частоты [13].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для иллюстрации эффективности вэйвлет-анализа ниже приведены результаты как для отдельного GLE, так и для их полного ряда за всё время наблюдений. На рис.1 показана эволюция осцилляций интенсивности ГКЛ за несколько дней перед GLE69. На верхних панелях слева приведена интенсивность космических лучей, включая возрастание потока СКЛ в течение дня данного GLE. Нижние панели демонстрируют периоды осцилляций в интенсивности частиц. Абсцисса на правой панели обозначает реальное время в днях, а по оси ординат показаны периоды осцилляций в днях. Более темным цветом показаны периодичности с большой мощностью (или с высокой степенью когерентности) между обоими спектрами; более светлая окраска соответствует осцилляциям с малой мощностью (или с низким уровнем когерентности). Маска U-образной формы очерчивает область когерентности с уровнем достоверности 95%.

Из рис.1 видно, что частоты осцилляций эволюционируют со временем: начиная с низкого значения частоты за много дней до события, частота постепенно повышается по мере приближения даты события. В день самого события все эти периоды (частоты) присутствуют одновременно. В целом вэйвлет-анализ показывает, что каждое из GLE характеризуется своим набором периодов, большинство из которых, однако, находится внутри интервала от 15 минут до 10 часов. На рис.2 приведены результаты вэйвлет-анализа для дат (дней) регистрации событий GLE. В дополнение к хорошо известным ранее периодам СА (0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 3.5, 7 и 11 лет), выявлены периоды длительностью 2.5, 5-8, 11, 22-30 и 60 дней. Были также обнаружены аномалии в спектре мощности СА

перед GLE. Обнаружено, что аномалии являются положительными, если GLE имеет амплитуду $>100\%$, и отрицательными при амплитуде $\leq 100\%$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Большинство найденных нами периодичностей являются общими для СКЛ, солнечных пятен и коронального индекса, т.е. имеет место синхронизация осцилляций в различных слоях солнечной атмосферы – от фотосферы до короны. Это может свидетельствовать о том, что генерация СКЛ затрагивает весьма большие области в атмосфере Солнца. Более спорным результатом нашей работы является вывод о возможности найти единый критерий для предсказания событий СКЛ, построенный на основе специфического поведения осцилляций ГКЛ за несколько недель (дней) до события GLE.

Совсем недавно авторы [14] применили вэйвлет-анализ для поиска периодичностей в поведении солнечного вспышечного индекса (SFI) в течение 21-23-го циклов СА. Во всех циклах СА на уровне значимости, по крайней мере, 90%, был найден период ~ 27 дней, который имеет очевидное происхождение (период солнечного вращения). Кроме того, были получены следующие чёткие периоды: 152 дня для цикла 21; 73 дня для цикла 22; 62 дня для цикла 23. В этом контексте, представляет интерес свойство GLE группироваться преимущественно на восходящих и нисходящих участках кривой 11-летнего цикла солнечных пятен [4, 5]. По данным наземных наблюдений за 1942-1990 гг. было показано [15], что солнечные вспышки, вызывающие GLE, по существу являются запрещенными во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака глобального магнитного поля Солнца вблизи периодов максимумов СА. Авторы [15] считают, что отсутствие GLE в максимуме СА объясняется не угнетением генерации СКЛ из-за сильных магнитных полей, а ухудшением эффективности ускорения частиц во время структурной перестройки полей Солнца в переходный период. Более того, структура крупномасштабных магнитных полей в короне сильно меняется в течение цикла. Поэтому, чтобы разделить эффекты ускорения СКЛ и их выхода из солнечной атмосферы, необходимо исследовать эту структуру для индивидуальных событий GLE [1, 2]. Более подробное изложение методики и наших результатов можно найти в [16].

Работа поддержана грантами УНАМ и КОНАСИТ (Мексика), РФФИ (07-02-01405, 08-02-92208, 09-02-98511), НШ-8499.2006.2, НШ-4573.2008.2, Программой ОФН-16 (Россия).

К статье Х.А. Перес-Пераса и др.

ПОИСК ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ,
СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ И КОРОНАЛЬНОМ ИНДЕКСЕ ПЕРЕД ПРИХОДОМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ ОТ СОЛНЦА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Miroshnichenko L.I.* Solar Cosmic Rays. Kluwer Academic Publishers, 2001.
2. *Miroshnichenko L.I. and Pérez-Peraza J.* // Intern. J. of Modern Phys. A. 2008. V.23. P.1.
3. *Reames D.V.* // Space Sci. Rev. 1990. V. 90. P. 413.
4. *Miroshnichenko L.I.* //Biophysics. 1992. V. 37. № 3. P. 364.
5. *Ващенко Э.В.* //Астрономич. Вестник. 2000. Т. 34. № 2. С. 173.
6. *Miroshnichenko L.I.* Radiation Hazard in Space. Kluwer Academic Publishers, 2003.
7. *Чуи К.* Введение в вэйлеты. М: Мир, 2001.
8. *Christiansen F., Haigh J.D., Lundstedt H.* // Executive Summary Report. ESTEC Contract No. 18453/04/NL/AR, Issue 1, September 5, 2007.
9. *Torrence C. and Compo G.* // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 61.
10. *Kumar P. and Foufoula-Georgiou E.* // Rev. Geophys. 1997. V. 34. P.385.
11. *Percival D.B. and Walden A.T.* Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
12. *Holmes D.G. and Lipo T.A.* Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Wiley and Sons, 2003.
13. *Gilman D.L., Fuglister F.J. and Mitchell J. M.* // J. Atmos. Sci. 1963, V. 20. P.182.
14. *Kilcik A., Özgüç A., Rozelot J.P., and Ataç T.* //Solar Phys. 2010. V. 264. P. 255.
15. *Nagashima K., Sakakibara S.,and Morishita I.* // Proc. 22nd ICRC. Dublin, Ireland. 1991. V. 3. P. 29.
16. *Pérez-Peraza J. et al.* (in all 5 authors) // Proc. 31st ICRC. Lodz, Poland. 2009. ID 1411.

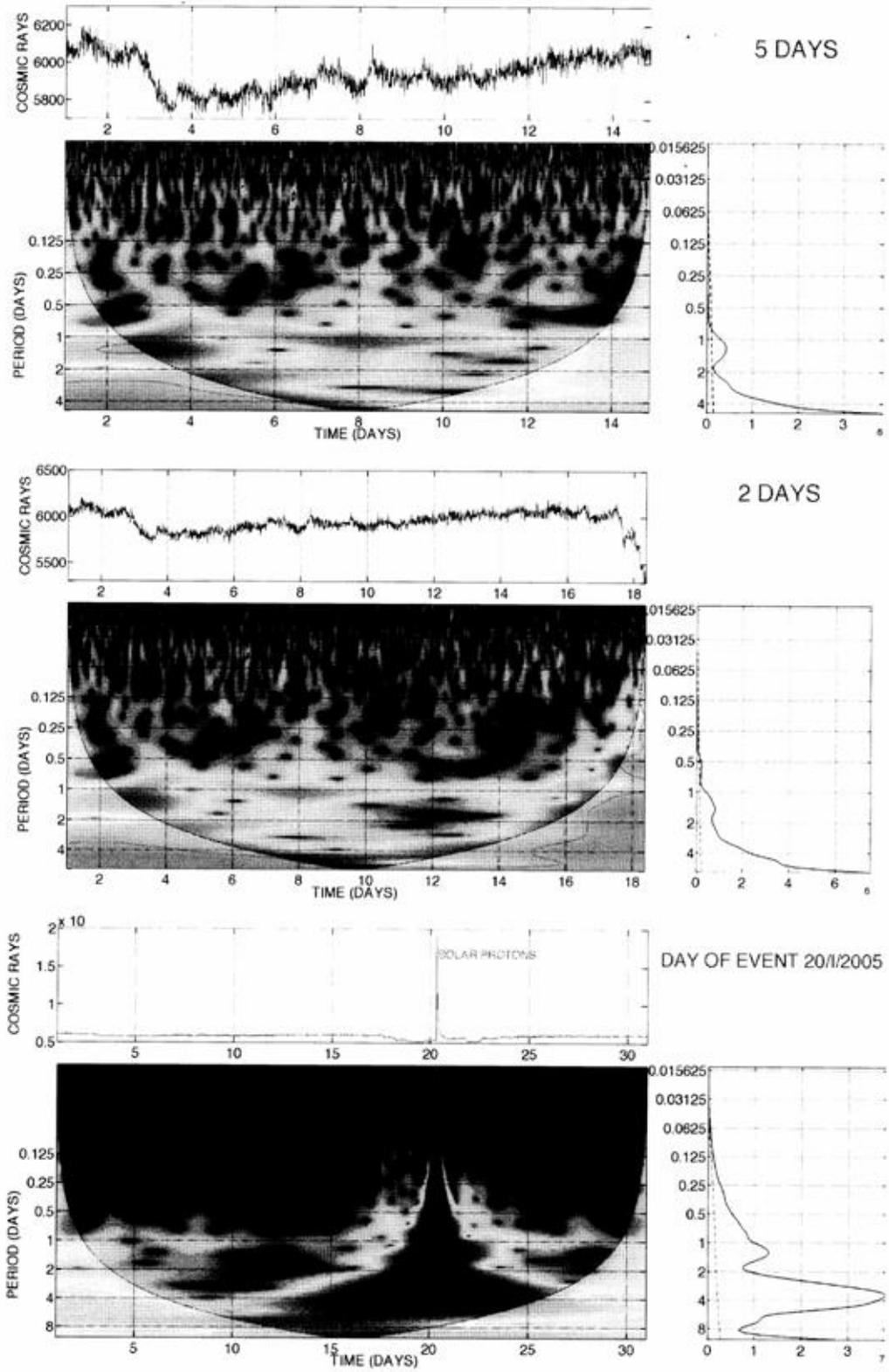


Рис.1.

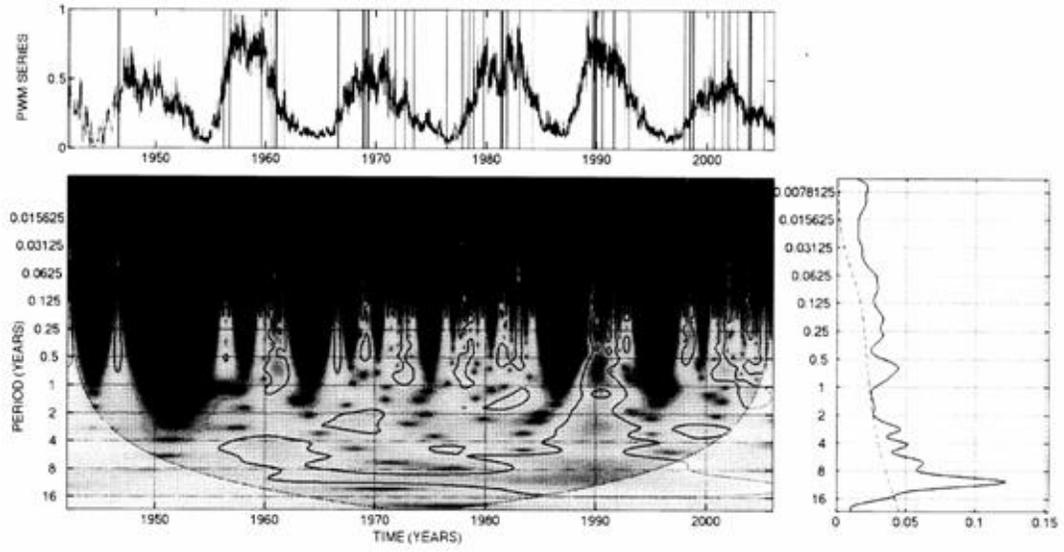


Рис.2.

Подписи к рисункам
К статье Х.А. Перес-Пераса и др.

ПОИСК ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ,
СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ И КОРОНАЛЬНОМ ИНДЕКСЕ ПЕРЕД ПРИХОДОМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ ОТ СОЛНЦА

Рис.1. Вариации интенсивности и эволюция спектра осцилляций ГКЛ (левые панели) перед наземным возрастанием СКЛ 20 января 2005 г. (GLE69). Справа показаны амплитуды осцилляций в днях в зависимости от реального времени. Пунктирной линией изображена мощность красного шума на уровне достоверности 95%.

Рис.2. Эволюция спектра осцилляций временного ряда, построенного для дат (дней) регистрации событий GLE за период 1942-2006 гг. (левая панель). Справа показаны амплитуды осцилляций в днях в зависимости от реального времени. Пунктирной линией изображена мощность красного шума на уровне достоверности 95%.

Сведения об авторах:

J.A. Pérez-Peraza:

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Coyoacán, 04510, México, D.F., MEXICO.

E-mail: perperaz@geofisica.unam.mx

V.M. Velasco-Herrera:

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Coyoacán, 04510, México, D.F., MEXICO. E-mail: vmv@geofisica.unam.mx

J. Zapotitla:

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Coyoacán, 04510, México, D.F., MEXICO. E-mail: vmv@geofisica.unam.mx

Л.И. Мирошниченко:

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкова Российской академии наук, Троицк, Московская область, 142190, Россия.

Телефон: 8-496-751-02-82 (ИЗМИРАН),

E-mail: leonty@izmiran.ru

Э.В. Вашенюк:

Полярный Геофизический институт РАН, Апатиты, Мурманская область, 184209, Россия.

E-mail: vashenyuk@pgia.ru

Search for Periodicities in Galactic Cosmic Rays, Sunspots and Coronal Index before Arrival of Relativistic Protons from the Sun

J.A. Pérez-Peraza¹, V.M. Velasco-Herrera¹, J. Zapotitla¹,
L.I. Miroshnichenko², E.V. Vashenyuk³

¹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México,
C.U., Coyoacán, 04510, México, D.F., MEXICO

²N.V. Pushkov Institute IZMIRAN, Russian Academy of Sciences (RAS),
Troitsk, Moscow Region, 142190, RUSSIA

³Polar Geophysical Institute, RAS, Apatity, Murmansk Region, 184209, RUSSIA

Abstract

Using different techniques of Wavelet Analysis, in particular, Cross-Wavelet Coherence and the Global Wavelet Spectrum, we analyze data of intensity of galactic cosmic rays (GCR) before 70 Ground Level Enhancements (GLEs) of solar cosmic rays (SCR) in the solar cycles 17-23 vs. data of the coronal index (CI) of solar activity that is a measure of solar irradiance in the coronal green line at 530.3 nm (Fe XIV). Common periodicities of short period (2.8, 5.2 and 27 days), medium period (0.5, 1.2, 1.8, and 3.2 years) as well as the 4.6 and 11 years have been found. Two later ones are continuous over the entire time interval, with the high synchronization and linear phase. In contrast, the short and medium periodicities are rather concentrated around the maxima of solar cycles, with some few cases in the minima of solar activity, and present in general a complex phase. Results are discussed in terms of the other studies related to periodicities of the solar dynamo, solar atmosphere, interplanetary space and cosmic rays. By means of sunspots we have also evaluated the power anomalies of solar activity before GLE occurrence. It was found that the anomalies are positive when the GLEs are of high amplitude (>100% relative to the cosmic ray background) and negative when events are of relatively low amplitude ($\leq 100\%$).