



КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Серия «Космические лучи»
Том 29

МОСКВА
МАОК 2014

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗРАСТАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (GLE)

Хорхе Перес Пераса¹, **Игорь Либин**^{2,3}, Алан Хуарес Сунига¹,
Хулиан Роман Сапотитла¹, Мануэль Алварес Мадригал¹,
Анна Киселева², Елена Логарчук²

¹Институт геофизики национального автономного университета Мексики, Мексика

²Международная академия оценки и консалтинга, Россия

³Система национальных университетов штата Оахака, Мексика

В наиболее мощных событиях поток СКЛ настолько велик, что вызывает спорадические выбросы солнечных релятивистских заряженных частиц. Эти выбросы (*возрастания космических лучей на поверхности Земли*) в данных наземных наблюдений космических лучей называются GLE (Ground Level Enhancements). Они выглядят как резкое увеличение интенсивности КЛ от нескольких процентов до 1000 процентов [Anashin et al., 2009; Belov et al., 2010]. GLE события достаточно редкие (с начала систематических наблюдений в начале 40-х годов зарегистрировано всего 71 событие, первое событие GLE01 было 28 февраля 1942 года и последнее GLE71 – 17 мая 2012).

Для понимания связей между GLE и солнечными вспышками в работах [Belov et al., 2010; Firoz et al., 2011; Perez Peraza et al., 2011; Gopalswamy et al., 2013] были проанализированы все события за период 1986–2006 гг. Анализ показал, что большинство высоких корреляционных связей (~78%, $R > 0,8$) наблюдались во время вспышек на Солнце класса X. В нынешнем 24-м цикле солнечной активности наблюдалось только одно GLE-событие (17 мая 2012 года), достаточно точно предсказанное нами год назад [Perez et al., 2011].

В настоящей работе, для разработки качественной методики предсказания появления GLE, мы попытались классифицировать характерные *возрастания космических лучей на поверхности Земли* (GLE), применяя метод анализа главных компонент (PCA).

Нужно отметить, что хотя GLE события являются спорадическими явлениями, которые, в определенной степени следуют за пове-

дением 11-летнего цикла солнечной активности (СА), тем не менее, однозначных соотношений не наблюдается. Так, например, в 23-м цикле было больше возрастаний космических лучей на поверхности Земли (GLE), чем в цикле 22, хотя последний был гораздо более интенсивным. В общей сложности было зарегистрировано 71 событие и, хотя средняя частота появления GLE составляет ~1.1 событий год, интервал между событиями может быть в несколько раз больше, как почти 6 лет, что наблюдалось в случае с GLE70 и GLE71.

Вейвлет-анализ согласованности между GLE событиями и данными фотосферных наблюдений, а также корональных серий, показывает, что большинство периодичностей связаны с поведением корональных слоев. Такая синхронизация, кажется, показывает, что GLE события не являются изолированными локальными явлениями, а являются следствием глобальных областей атмосферы Солнца. Этот факт свидетельствует против полной стохастичности GLE событий.

Для определения основных периодичностей колебаний нестационарных рядов, какими являются данные наблюдений галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ), а также их эволюции во времени, мы применяли Вейвлет-анализ Морле [Torrence and Compo, 1998]. Когда в анализируемых рядах резко выделялись интенсивности отдельных событий (как для GLE событий, так и для ГКЛ фон колеблется от $< 1\%$ до $\sim 4000\%$), то удобно также использовать специальную технику «Импульс с модуляцией» (PwM) [Holmes, 2003]. Этот метод используется исключительно для получения времени распределения серии GLE, хотя может быть применен и для анализа других свойств анализируемых рядов, таких как интенсивность, профиль, стабилизации и т.д. Кроме того, для исследования когерентности серий наблюдений с различными весами (сравнение RSP или GCR с различными индексами солнечной активности) также применялся метод PwM.

Мы применили вейвлет-анализ для оценки серий ежесуточных данных ГКЛ (в верхней части рис. *Вейвлет-спектр*), получая их вейвлет-спектры и глобальные энергетические спектры (спектры мощности). Полученные результаты позволяют (с высокой надеж-

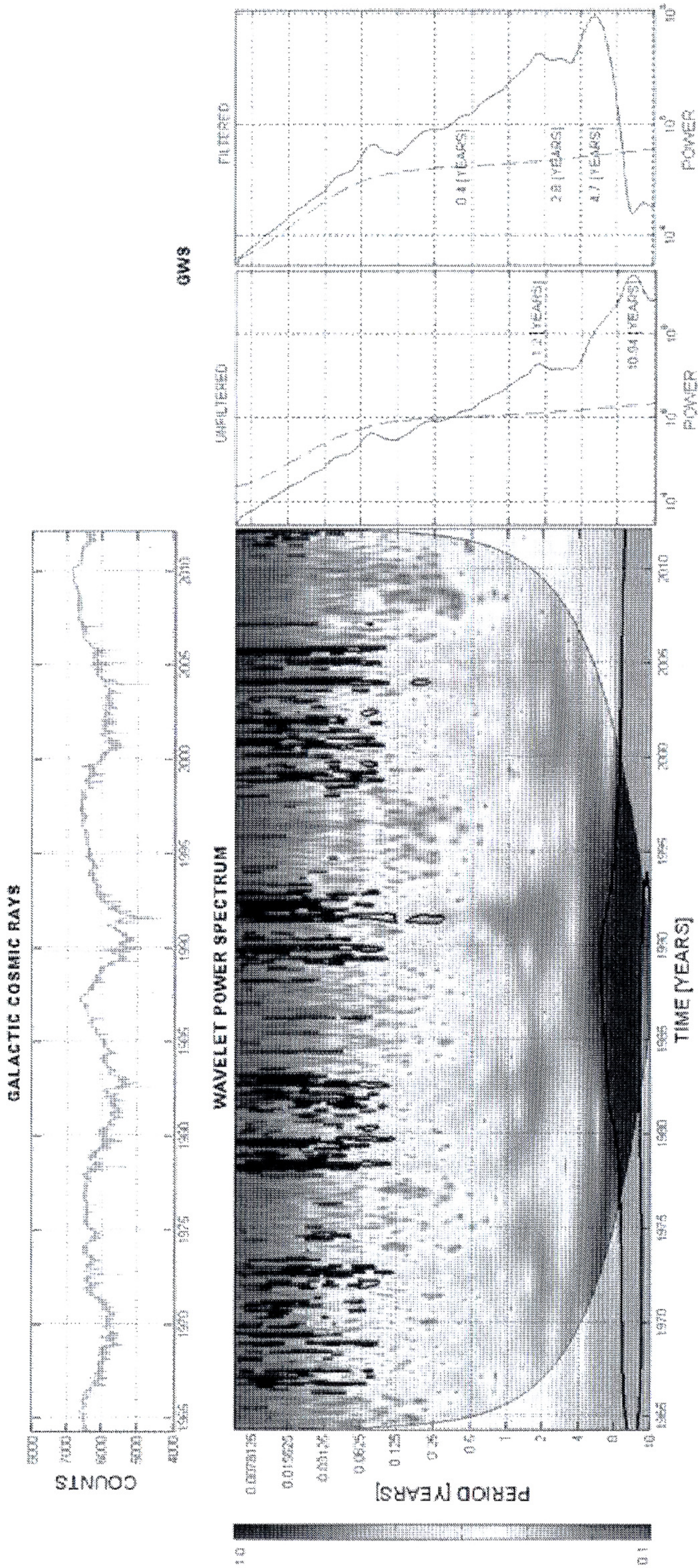


Рис. 1. Вейвлет-спектр и глобальный энергетический спектр (справа, до и после фильтрации)

ностью) утверждать, что самые уверенные периодичности, которые мы видим, находятся в диапазоне от 0,29 до 16 лет, при этом наиболее достоверным (с энергетической точки зрения) является пик в 10,94 лет (рис.1). Установлено, что 10,94-летняя периодичность позволяет классифицировать примерно 65–70 событий. Для того, чтобы различать высокие частоты применялся фильтр Добеши [Torrence and Webster, 1999], позволяющий довольно точно удалить гармоники от частоты 10,94 лет (которая содержит довольно высокую спектральную энергию и поэтому скрывает более короткие периоды).

Применение Вейвлет-Морле анализа для каждого GLE события и для всех GLE событий показал, что для повышения точности вычислений периодичностей, все GLE события могут и должны быть разделены на три группы (в зависимости от уровня возрастания каждого события): группа А – события с возрастанием интенсивности до 6% , группа В – от 5 до 17%, и группа С (с перекрытием частично группы В) – от 12 до 4000%. Анализ каждой из групп показывает, что для группы А, спектральные мощности группы очень низки, а сами периодичности едва обнаруживаются на фоне подобных сигналов ГКЛ. Анализ аналогичных групп В и С обнаружил широкий диапазон периодов, при этом, спектры мощности для последней группы настолько высоки, чтобы могут исказить вейвлет-спектр сигнала ГКЛ. *Следует отметить, что события с похожими возрастаниями могут содержать различные спектральные мощности, даже при наличии аналогичных периодичностей, что, по-видимому, может быть связано с особенностями источника процессов.*

В результате анализа за 1942–2006 годы показано, что если все GLE события классифицировать в терминах их усиления интенсивности и исследовать в дальнейшем по группам, то, принимая во внимание только их временное распределение, можно предсказать возникновение будущих GLE событий, причем даже, с той или иной вероятностью, видимо их класс (группу).

На первом этапе анализа мы рассматривали только временное распределение GLE для каждой из групп, преобразуя их во временной ряд возникновения даты GLE (методика PwM, [Holmes, 2003]) типа: 1 – событие, 0 – нет события. Для того, чтобы попытаться найти

временные связи между импульсами, применялся вейвлет-анализ к этому преобразованному ряду. (Применение точки отсечения на уровне 0.95% выделяет достоверные периодичности). При этом, из выделенных колебаний с периодами от 0,29 до 16 лет, периодичность 10.9 лет превышает 95%-ный доверительный интервал, что доказывает несомненную генетическую связь GLE событий с солнечной активностью и вспышечной деятельностью Солнца.

Действительно, применение Вейвлет-анализа и анти-Фурье-преобразования [Perez et al., 2012; Perez Peraza and Libin, 2012; Perez Peraza, Dorman, Libin, 2012] показывает, что 10,9-летняя периодичность, которая контролирует вейвлет-спектр, позволяет классифицировать практически 60 событий в различных группах и дать прогноз для различных гармоник основного колебания с той или иной вероятностью.

Проведенный анализ приводит нас к предварительной дате возникновения следующего события GLE, в интервале от 15 апреля до 15 октября 2014 года.

Анализ всей выборки возрастных космических лучей на поверхности Земли (GLE) авторегрессионными спектральными методами (ARCC) позволил получить похожие результаты. При доминирующей 11-летней периодичности, в выборке присутствуют шестимесячные, квазидвухлетние колебания и колебания с периодами порядка 3 и 5 лет, при этом, хорошо видно, что когерентность периодичностей меньше 11-летней также довольно высока. Представление выборки GLE в виде стандартного авторегрессионного уравнения, как суммы всех пяти вышеприведенных колебаний, приводит к вероятной дате возникновения следующего GLE события в течение второй половины 2014 года, что согласуется с основным результатом.

Остается только ждать.

Литература

Anashin V., A.V. Belov, E.A. Eroshenko, O.N. Krjakunova, H. Mavromichalaki, I. Ishutin, C. Sarlanis, G. Souvatsoglo, E. Vashenyuk, V.G. Yanke. The ALERT signal of ground level enhancements of solar

cosmic rays: physics basis, the ways of realization and development. Proc. of the 31 st ICRC, Lodz, 2009.

Белов А., Гарсия Г., Курт В., Мавромичалаки Е. Протонные события и рентгеновские вспышки в трех последних циклах солнечной активности, Космические Исследования, 43, №3, 171–185, 2005.

Belov A.V., E.A. Eroshenko, O.N. Kryakunova, V.G. Kurt, V.G. Yanke. Ground level enhancements of solar cosmic rays during the last three solar cycles, Geomagnetism and Aeronomy, vol. 50, №1, pp. 21–33, 2010.

Блох Я.Л., Либин И.Я., Юдахин К.Ф. Флуктуации космических лучей на Земле во время солнечных вспышек. Геомагнетизм и Аэрoномия, т. 24. №6. 1984.

Dorman L.I., Lbin I.Ya., Yudakhin K.F. The role of the energy spectrum of the anisotropy in the variations of the cosmic ray fluctuations power spectrum before the interplanetary disturbances. Astrophys. & Space Sci., v. 123. 1986.

Dorman L.I., L.A.Pustil'nik, A. Sternlieb, I.G. Zukerman, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.G. Yanke, H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, S. Tatsis, N. Iucci, G. Villoresi, Yu. Fedorov, B. A. Shakhov, M. Murat, «Monitoring and Forecasting of Great Solar Proton Events Using the Neutron Monitor Network in Real Time», IEEE Transactions on Plasma Science, 32, №4, 1478–1488, 2004.

Firoz K.A., Y.-J. Moon, K.-S. Cho, J. Hwang, Y.D. Park, K. Kudela, L.I. Dorman. On the relationship between ground level enhancement and solar flare. Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012), vol. 116, Issue A4. 2011.

Gopalswamy N., H. Xie, S. Akiyama, S. Yashiro, I. G. Usoskin, J. M. Davila. The First Ground Level Enhancement Event of Solar Cycle 24: Direct Observation of Shock Formation and Particle Release Heights. Solar and Stellar Astrophysics (astro-ph.SR), arxiv:1302.1474 [astro-ph.SR], 2013.

Kuwabara T., J. W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, R. Pyle. Development of a GLE Alarm System Based Upon Neutron Monitors, Space Weather, vol. 4, S08001, doi:10.1029/2005SW000204, 2006.

Libin I.Ya. Cosmic Ray Fluctuations. SH21C-04, Proc. of the AGU Meeting of the Americas, Cancun, Mexico, 14–17 May 2013

Mavromichalaki H., Gerontidou M., Mariatos G. Planaki C, Papaioan-

nou A., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Tsitomeneas S. Space Weather Forecasting at the New Athens Center: The Recent Extreme Events of January 2005, IEEE Transactions on nuclear science, vol. 52, №6, December 2005.

Мавромичалаки Х., Сарланис Ч., Соуватзоглу Дж., Дробжев В.И., Дрынъ Е., Крякунова О.Н., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Клепач Е.Г., Янке В.Г. Использование наземных возрастаний солнечных космических лучей для оценки радиационной опасности: создание алертного сигнала наземных возрастаний. Космические лучи №29, М.: МАОК, 2013.

Перес-Пераса Х., Либин И.Я., Трейгер Е.М. Предвестники космических бурь. В кн.: Международное экономическое сотрудничество: зарубежный опыт для России. М.: МАОК. Вып. 2. 2008. с.12–18.

Perez Peraza J., J. Zapotitla, I.Ya. Libin, J.C. Ortiz, M.G. Orozco. Attempting to predict Ground Level Enhancement 71 by means of Principal Component Analysis. Proc. American Geophysical Union, 2011.

Perez Peraza J., Libin I. Space Sources of Earth's Climate: Natural science and economic aspects of global warming. Padova–Moscow: Euro Media, 2011

Perez Peraza J., Libin I. Highlights in Helioclimatology. Boston: Elsevier, (MA), USA, 2012

Torrence, C. and Compo, G. , Bull. American Meteorol. Soc. 79, 61–78, 1998.

Torrence C. and Webster P., J. Clim. 12, 2679–2690. 1999

Holmes, D.G. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Ed. Thomas A., Wiley and Sons, 2003

Jolliffe, I.T., Principal Component Analysis, 2°Edition. Springer, USA, 487 pp. 1986