

УДК 551

**МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ЗЕМЛЕ:  
О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА  
ВОЗРАСТАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (GLE) С УЧЕТОМ  
ИХ КЛАССИФИКАЦИИ**

**<sup>1</sup>Пераса Хорхе Перес, <sup>2,3</sup>Либин И., <sup>1</sup>Сунига Алан Хуарес, <sup>1</sup>Сапотитла Хулиан Роман,  
<sup>1</sup>Мадригал Мануэль Алварес**

<sup>1</sup>*Институт геофизики Национального автономного университета Мексики, Мехико;*

<sup>2</sup>*Система национальных университетов штата Оахака, Уатулько;*

<sup>3</sup>*НОУ ВПО «Международная академия оценки и консалтинга», Москва, e-mail: libin@bk.ru*

Используя классический Вейвлет-Морле анализ, проведена классификация возрастных СКЛ 3-х основных групп GLE, в зависимости от величины возрастания интенсивности. Такое исследование было ориентировано на ультракороткие периодичности, которые находятся в масштабе времени процессов производства СКЛ в источнике. Эти периодичности согласуются с аналогичными изменениями солнечной активности, подтверждающими, что их появление не является локальным изолированным феноменом.

**Ключевые слова:** мониторинг космической погоды, классификация GLE

**MONITORING OF SPACE WEATHER ON EARTH: THE POSSIBILITY  
OF GROUND LEVEL ENHANCEMENT (GLE), FORECASTING BASED  
ON THEIR CLASSIFICATION**

**<sup>1</sup>Peraza Jorge Perez, <sup>2,3</sup>Libin I., <sup>1</sup>Zúñiga Alan Juárez, <sup>1</sup>Julián Zapotitla Román,  
<sup>1</sup>Madriral Manuel Alvarez**

<sup>1</sup>*Geophysical Institute of UNAM, Mexico;*

<sup>2</sup>*Sea University of SUNEI, Huatulco, Mexico;*

<sup>3</sup>*International Academy of Appraisal and Consulting, Moscow, e-mail: libin@bk.ru*

Using the classical Morlet Wavelet analysis, developed a classification of increases SCR 3 main groups GLE, depending on the value of increasing intensity. This study was oriented to ultra-short-periodicity, which are in-time processes of production in the SCR source. These periodicity consistent with similar changes in solar activity, confirming that their appearance is not a local isolated phenomenon.

**Keywords:** Monitoring of space weather on Earth, classification GLE's

Актуальность изучения солнечных высокоэнергичных частиц определяется влиянием вспышечной активности Солнца на состояние магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли, на функционирование космических и земных высокотехнических технологических систем и на здоровье космонавтов.

Одним из важнейших «агентов» такого влияния является корпускулярное солнечное излучение (СКЛ), образующееся во время солнечных вспышек. Как правило, диапазон энергий СКЛ лежит от нескольких МэВ до единиц ГэВ, но в наиболее мощных вспышках наблюдались солнечные протоны с энергиями до 30-40 ГэВ. Такие СКЛ могут служить предвестниками радиационной опасности в околоземном пространстве, вызванной интенсивным потоком СКЛ более низких энергий, поскольку их скорость практически равна скорости света, и они долетают до Земли много раньше, чем возмущения межпланетной среды, порождаемые вспышками [4].

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 до 1000 процентов [1]. GLE – события достаточно редкие: на сегодня зарегистрировано всего 71 событие, первое – GLE01 наблюдали 28 февраля 1942 года, последнее GLE71 – 17 мая 2012.

Для понимания связей между GLE и солнечными вспышками в работах [1-3] были проанализированы все события за период 1986-2010 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 [3].

Несмотря на относительную «редкость» GLE событий и учитывая чрезвычайно малое опережение (~ 20 минут) Алерт-сигналом [1] активной фазы возрастания GLE, чрезвычайно важным становится возможность долгосрочного (пусть и не вполне точного) предсказания появления самих GLE событий.

1. В настоящей работе, для разработки методики прогноза появления GLE, мы попытались классифицировать характерные возрастания космических лучей на поверхности Земли (GLE) релятивистских солнечных частиц (RSP) и разработать сам прогноз GLE, применяя анализ главных компонент (PCA).

Нужно отметить, что хотя GLE события являются спорадическими явлениями, которые, в определенной степени следуют за поведением 11-летнего цикла солнечной активности (CA), 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. И, хотя средняя частота появления GLE составляет ~ 1.1 событий год, интервал между событиями может быть в несколько раз больше, как почти 6 лет в случае с GLE70 и GLE71.

Последовательность МГД процессов, которые происходят в суб-фотосфере и различных слоях солнечной атмосферы, представляет собой очень сложную эволюцию во времени и пространстве. Огромное количество усилий было предпринято в течение десятилетий, чтобы объяснить такую эволюцию. Тем не менее, с помощью существующих теоретических моделей, и по сей день, можно очень мало сделать для прогноза возникновения солнечной вспышки, отвечающей за появление GLE. Возможно именно поэтому, в некоторых работах предполагается, что GLE является случайным явлением.

С помощью анализа данных серии GLE событий выявлялись их циклические тенденции, которые представлены в виде гармонических сигналов и определяются внутренней периодичностью самих GLE событий: среднесрочными периодичностями (от нескольких месяцев до нескольких лет), краткосрочными периодичностями (порядка нескольких дней) и ультра-короткими периодичностями (от нескольких минут до часов).

Вейвлет-анализ согласованности между GLE событиями и данными фотосферных наблюдений, а также корональных серий, показывает, что большинство периодич-

ностей, упомянутых выше, связаны с поведением корональных слоев. Такая синхронизация показывают, что GLE события не являются изолированными локальными явлениями, а являются следствием глобальных областей атмосферы Солнца. Этот факт свидетельствует против полной стохастичности GLE событий.

Следовательно, игнорируя привлечение сложных теоретических физических моделей, мы развиваем здесь полуэмпирический метод для прогнозирования GLE за несколько месяцев (и даже лет).

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, применялся Вейвлет-анализ Морле, который незаменим при работе с нестационарными рядами. Кроме того, в работе использовалась специальный метод «Импульс с модуляцией» (PwM) [5]. 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. Т.е. предполагается, что временной ряд имеет среднюю мощность спектра, по отношению к красному шуму Фурье выше, чем среднее значение спектра, и представляют собой реальные сигналы с уровнем значимости выше, чем 95%.

Мы применили вейвлет-анализ для оценки серий ежесуточных данных ГКЛ (в верхней части рис. 1), получая их вейвлет-спектры и глобальные энергетические спектры (спектры мощности). Полученные результаты позволяют (с высокой надежностью) утверждать, что самые достоверные периодичности, которые мы видим, находятся в диапазоне от 0,29 до 16 лет, при этом наиболее значимым является пик в 10,94 лет.

Установлено, что 10,94-летняя периодичность позволяет классифицировать примерно 70 событий. Необходимо отметить, что некоторые из выделенных периодичностей в СКЛ (0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 3.5, 7 и 11 лет.) совпали с периодичностями в солнечной активности (рис.2 и 3). Кроме того, были выделены совпадающие краткосрочные периодичности (2.5, 5-8, 11, 22-30 и 60 дней) и, наконец, ультра-короткие периодичности порядка от 20 минут до 3-х часов. Для того, чтобы выделять высокие частоты применялся фильтр Добеши [5], позволяющий для их анализа довольно точно удалить гармоники от частоты 10,94 лет (которая скрывает более короткие периоды).

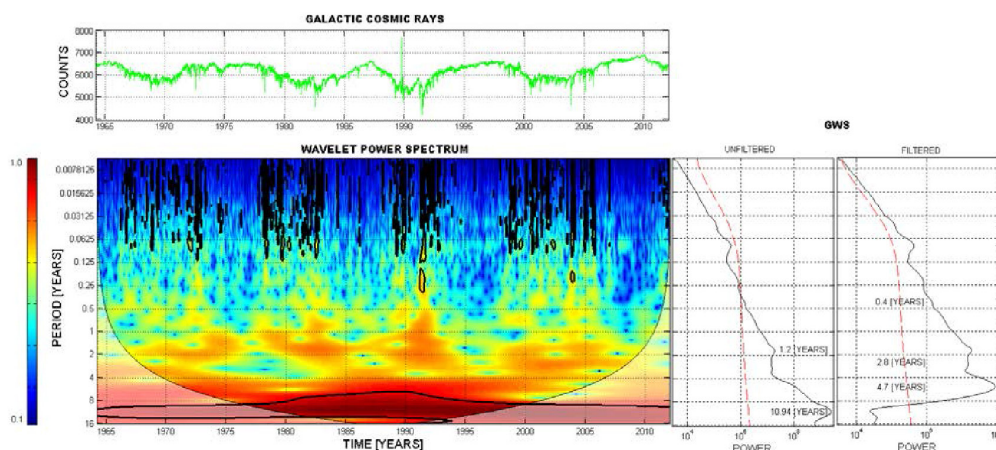


Рис. 1 Вейвлет-спектр и глобальный энергетический спектр (справа, до и после фильтрации)

Вейвлет-Морле анализ для каждого GLE события и для всех 70 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% -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 от 3-12 часов (для группы В) и от 11 минут до нескольких часов (группа С), при этом, спектры мощности для последней группы настолько высоки, чтобы возмутить вейвлет-спектр сигнала ГКЛ. Самые низкие возрастания в группе составляют примерно 12% (события 41 и 61), самые высокие – 4000% (событие 5).

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.

2. В результате анализа за 1942-2006 гг. показано, что если все GLE события классифицировать в терминах усиления их 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 ве-

роятностью, их класс (группу). При этом, даже если все события имеют различную величину, мы переходим к преобразованию их во временной ряд возникновения даты 70 GLE (методика PwM), типа: 1 = событие, 0 = нет события.

Для того чтобы найти временную связь между импульсами, мы применяем вейвлет-анализ к этому преобразованному ряду для всей выборки за 1942-2010 гг. Применение точки отсечения на уровне 0.95-0,99%, уверенно выделяет достоверные периодичности. При этом, из выделенных колебаний с периодами от 0,29 до 16 лет, периодичность 10,9 лет превышает 99%-й доверительный интервал, что доказывает генетическую связь GLE событий с солнечной активностью и вспышечной деятельностью Солнца.

Действительно, применение Вейвлет-анализа и анти-Фурье-преобразования [3] показывает, что 10,9-летняя периодичность, которая контролирует вейвлет-спектр, позволяет классифицировать все 70 событий в 6 группах, как показано на рис. 1 и дает прогноз для различных гармоник основного колебания (см. рис. 2 и 3).

Каждая из гармоник представляет собой вероятностную область для возникновения нового GLE события, однако, первое условие устанавливает очень широкий диапазон попадания (около 5 лет), который не дает нам никакой полезной информации. Для уточнения информации используются последовательно, шаг за шагом, все более короткие гармоники (до 0,29 лет), что позволяет разграничить разумный промежуток времени возникновения GLE.

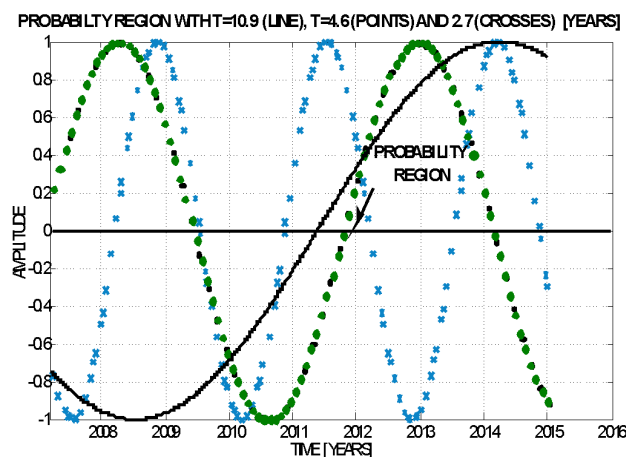


Рис.2 Вероятностные области для возникновения первого события группы 7 (GLE) в зависимости от периодичностей 10,9, 4,6 и 2,7 лет

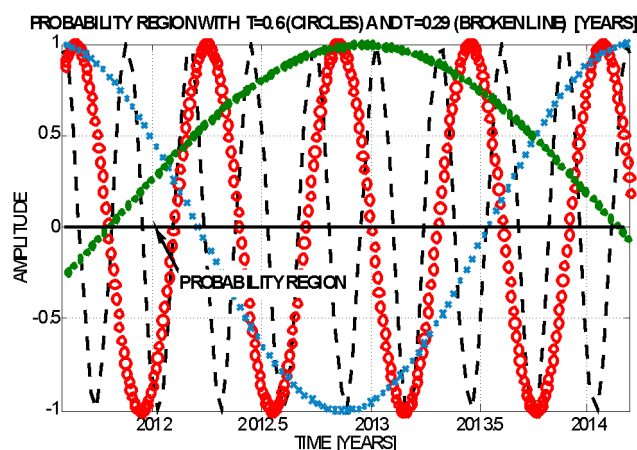


Рис.3 Вероятностные области появления GLE в соответствии с периодичностями от 0,6 до 2,9 лет

**Заключение.** Анализ всей выборки 70 возрастных космических лучей на поверхности Земли (GLE) авторегрессионными спектральными методами (ARCC) показал, что, при доминирующей 11-летней периодичности, в выборке присутствуют шестимесячные, квазидвухлетние колебания и колебания с периодами порядка 2.8 и 5 лет. Представление выборки 70 значений GLE в виде стандартного авторегрессионного уравнения, как суммы всех пяти вышеприведенных колебаний, приводит к вероятной дате возникновения следующего GLE события (GLE72) в интервале с декабря 2013 года по май 2014 года.

Используя классический Вейвлет-Морле анализ, проведена классификация периодичностей СКЛ 3-х основных групп GLE, в зависимости от величины возрастания интенсивности. Это исследование было ориентировано на ультракороткие периодичности, которые находятся в масштабе времени процессов производства СКЛ в источник. Эти периодичности согласуются с аналогичны-

ми изменениями солнечной активности, подтверждающими, что их появление не является локальным изолированным феноменом.

Проведенные расчеты приводят к предварительной дате возникновения следующего события, GLE72, в интервале от 30 ноября 2013 года до 30 января 2014 года.

Остается только ждать.

#### Список литературы

1. Belov A.V., Eroshenko E.A., Kryakunova O.N., Kurt V.G., Yanke V.G. Ground level enhancements of solar cosmic rays during the last three solar cycles // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. Vol. 50, no 1. – P. 21–33.
2. Firoz K.A., Moon Y.-J., Cho K.-S., Hwang J., Park Y.D., Kudela K., Dorman L.I. On the relationship between ground level enhancement and solar flare // Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012). – 2011. Vol. 116, Issue A4.
3. Perez Peraza J., Zapotitla J., Libin I.Ya., Ortiz J.C., Orozco M.G. Attempting to predict Ground Level Enhancement 71 by means of Principal Component Analysis // Proc. American Geophysical Union. – 2011. P. 193–202.
4. Perez Peraza J., Libin I. Highlights in Helioclimatology. – Boston: Elsevier, 2012. – 284 p.
5. Holmes, D.G. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. [Ed. Thomas A.]. MA: Wiley and Sons, 2003. – P. 98–165.