

УДК 537.591.5

ОСЦИЛЛЯЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСОВ ПЕРЕД ПРИХОДОМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ ОТ СОЛНЦА

© 2012 г. Л. И. Мирошниченко^{1,2}, Х. А. Перес-Пераса³, В. М. Веласко-Эррера³,
Х. Запотитла³, Э. В. Вашенюк⁴

¹ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

²НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

³Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Coahuacán, 04510, México

⁴ФГБУ науки Полярный Геофизический институт РАН, г. Анапиты (Мурманская обл.)

E-mail: leonty@izmiran.ru

Поступила в редакцию 02.11.2010 г.

После доработки 25.07.2011 г.

С помощью техники вэйвлет-анализа предпринят поиск осцилляций галактических космических лучей (ГКЛ), числа солнечных пятен SS и коронального индекса CI, эволюция которых могла бы служить предвестником наземных возрастаний (GLE) солнечных космических лучей (СКЛ). Из общего числа (70) событий GLE, зарегистрированных в 1942–2006 гг. для анализа были отобраны четыре выдающихся события – 23 февраля 1956 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г. На их примере показано, что по мере приближения дня события GLE частота осцилляций ГКЛ уменьшается. Изучены также характеристики общих осцилляций потоков ГКЛ и СКЛ внутри временного интервала отдельного GLE. Особый интерес представляют вариации частоты GLE η в зависимости от уровня солнечной активности (СА) на различных стадиях солнечного цикла. Во временных рядах числа солнечных пятен SS и коронального индекса CI обнаружены осцилляции в области коротких (2.8, 5.2, 27 и 60 дней), средних (0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 1.8 и 3.2 года) и длинных (4.6 и 11.0 лет) периодов. Короткие и средние периоды тяготеют к максимумам СА и характеризуются сложными фазовыми отношениями. При сопоставлении этих результатов с осцилляциями η показано, что период ~11 лет является доминирующим (контролирующим), он сохраняется в течение всего интервала 1942–2006 гг. При этом проявляются высокая степень синхронизации и четкие линейные соотношения между фазами осцилляций η , SS и CI. Это может означать, что генерация СКЛ не является изолированным (локальным) стохастическим явлением, характерным исключительно для хромосферных и/или корональных структур. В действительности этот процесс может носить глобальный характер и затрагивать большие области в атмосфере Солнца.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (СПС) с большими потоками ускоренных на Солнце частиц (солнечных космических лучей, или СКЛ) наблюдаются вблизи орбиты Земли довольно часто; они представляют собой одно из важнейших проявлений солнечной активности (СА). До последнего времени их обычно рассматривали как случайный (стохастический) процесс, обусловленный в основном солнечными вспышками (см., например, [Miroshnichenko, 2001; Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]). Вместе с тем, тесная связь СПС с центрами СА, корональными выбросами вещества (СМЕ) и ударными волнами в настоящее время также не подлежит сомнению [Reames, 1999; Miroshnichenko, 2001]. Наконец, можно утверждать, что частота СПС, наблюдаемых на орбите Земли, в общем, следует 11-летне-

му циклу СА [Мирошниченко, 1992; Вашенюк, 2000; Miroshnichenko, 2001, 2003].

Большинство СПС наблюдаются в нерелятивистской области энергий (от ≥ 10 МэВ до ≤ 500 МэВ для протонов). Частицы СКЛ с такими энергиями регистрируются в основном на космических аппаратах (КА) в межпланетном пространстве, на орбитах ИСЗ в магнитосфере, а также при полетах шаров-зондов на высотах стратосферы; при этом никаких эффектов на поверхности Земли такие частицы не вызывают. Осцилляции различных характеристик СПС (в частности, частоты и флюенса таких событий при энергиях протонов ≥ 10 МэВ, ≥ 30 МэВ и т.п.), широко исследовались в прошлом (см., например, [Мирошниченко, 1992; Miroshnichenko, 2001, 2003]). При этом были выявлены многие периоды, присущие другим параметрам СА, в частности, периоды длиной около 5-ти месяцев и ~2-х лет. С учетом

этих результатов были предложены методики для прогнозирования потоков СКЛ с энергиями ≥ 10 МэВ на периоды до 11-ти лет [Miroshnichenko, 2003].

Спорадически, со средней частотой $\eta \sim 1.0$ раз в год, к Земле приходят релятивистские солнечные протоны с энергией от 500 МэВ до ≥ 10 ГэВ. События такого типа получили название наземных возрастаний СКЛ, или Ground Level Enhancements (GLEs). В настоящее время они обычно регистрируются на поверхности Земли мировой сетью нейтронных мониторов (НМ) и мюонных телескопов (МТ). Всего за период 1942–2006 гг. было зафиксировано 70 GLE [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008], причем первое и последнее из них, в принятой ныне нумерации, наблюдались, соответственно, 28 февраля 1942 г. (GLE01) и 13 декабря 2006 г. (GLE70). Широко известное экстремальное событие 23 февраля 1956 г. (GLE05) до сих пор остается самым большим за всю историю наблюдений. По величине потока релятивистских протонов вторым среди 70-ти GLE оказалось событие 20 января 2005 г. (GLE69), причем оба экстремальных события включены в наш анализ (см. ниже).

Как известно, события 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 [Nagashima et al., 1991; Вашенюк, 2000; Miroshnichenko, 2001]. Такая квазирегулярность в поведении величины η была резко нарушена в 22-ом цикле СА. Так, например, за три года (июль 1989–июнь 1991 гг.) было зарегистрировано 13 GLE, и только 2 дополнительных события СКЛ этого цикла были зафиксированы в 1992 г. Таким образом, совершенно очевидным остается тот факт, что на фоне квазипериодических 11-летних вариаций η оказываются возможными очень сильные флуктуации частоты появления отдельных GLE (см., например, [Вашенюк, 2000; Miroshnichenko, 2001, 2003; Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]).

Изучение характеристик СПС (и, в частности, GLE) дает ценные сведения о свойствах источника, процессах ускорения и переноса ускоренных частиц, о фундаментальных свойствах Солнца как звезды, например, о структуре и динамике магнитных полей в солнечной атмосфере, о максимальных возможностях солнечного ускорителя (или ускорителей), о магнитных параметрах межпланетной среды. С другой стороны, остается актуальной задача обеспечения радиационной безопасности для экипажей и электроники на борту КА, особенно при планировании и осуществлении межпланетных миссий [Miroshnichenko, 2003, 2005]. В связи с важностью отмеченных фундаментальных и прикладных проблем сол-

нечно-земной физики, в настоящей работе, впервые средствами современной техники вэйвлет-анализа [Torrence and Compo, 1998; Percival and Walden, 2000; Чуи, 2001; Короновский и Храмов, 2003; Holmes and Lipo, 2003], предпринята попытка исследовать поведение ряда космофизических и солнечных параметров накануне GLE.

Среди изучаемых параметров первостепенный интерес представляют осцилляции галактических космических лучей (ГКЛ), поскольку они отражают состояние межпланетной среды, а именно – уровень турбулентности межпланетного магнитного поля (ММП), где будет происходить распространение СКЛ. Уровень турбулентности ММП, в свою очередь, зависит от уровня и характера солнечной активности (пятна, вспышки, СМЕ и т.п.). При этом глобальные возмущения около-солнечной среды (вплоть до орбиты Земли) на больших интервалах времени определяются числом солнечных пятен (SS). Другим важным показателем глобальной солнечной активности является так называемый корональный индекс (CI) – яркость короны в зеленой области оптического излучения. Таким образом, нас интересуют, прежде всего, осцилляции трех параметров, которые прямо или косвенно определяют наиболее важные (исходные) условия генерации и переноса СКЛ. Далее мы переходим к анализу частоты событий GLE η и ее связей (когерентности и синхронизации) с осцилляциями других параметров.

Предварительные результаты нашего исследования были кратко изложены ранее в публикациях [Perez-Peraza et al., 2009; Перес-Пераса и др., 2011]. Главная методическая цель нашей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать как возможности, так и трудности вэйвлет-анализа для изучения СКЛ и связанных с ними солнечных и межпланетных явлений. Перспективными физическими и прикладными аспектами такого исследования являются выяснение фундаментальных закономерностей ускорения частиц на Солнце и поиск наблюдательных критериев (предвестников) для прогнозирования GLE. В разделе 2 дано описание методов исследования и характеристик используемого наблюдательного материала. Раздел 3 содержит результаты вэйвлет-анализа осцилляций интенсивности космических лучей. Особый интерес представляет уникальные данные о вариациях частоты регистрации GLE (раздел 4). Наконец, в разделе 5 проводится критическое обсуждение всех полученных результатов, излагаются основные выводы.

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Как отмечается в отчете [Christiansen et al., 2007], активность Солнца часто отличается нелинейным, кратковременным и хаотическим пове-

дением. Поэтому представляется целесообразным использовать соответствующие методы вэйвлет-анализа для того, чтобы сравнить наблюдаемые вариации индикаторов активности с их математическими моделями. Такое сравнение, в конечном счете, позволит лучше описывать поведение тороидального и полоидального магнитных полей солнечного динамо. Вэйвлет-анализ является мощным средством для выявления преобладающей моды осцилляций, а также для изучения их эволюции со временем, путем преобразования нелинейных временных рядов в пространство “время–частота” [Torrence and Compo, 1998]. С другой стороны, вэйвлет-анализ представляет собой усложненный и усовершенствованный вариант гармонического анализа, когда последний проводится совместно со сжатием различных данных (например, солнечных и геофизических) в широкой области приложений [Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997; Percival and Walden, 1993, 2000; Holmes and Lipo, 2003; Velasco et al., 2008]. В частности, технику вэйвлет-анализа часто применяют к временным рядам для быстрого обнаружения кратковременных явлений. Заметим, что обычный временной ряд обеспечивает хорошую временную локализацию сигнала, но не содержит никакой информации о частоте осцилляций. С другой стороны, преобразование Фурье дает высокое частотное разрешение, но не обеспечивает временной локализации сигнала. В этом отношении вэйвлет является “оптимальной” комбинацией временной локализации и частотных характеристик изучаемых осцилляций.

К сожалению, первичные данные наблюдений GLE за период 1942–1960 гг. имеют ряд ограничений из-за небольшого количества станций космических лучей и технических возможностей регистрации СКЛ в то время. Регулярные данные, полученные для ряда GLE за тот период, обычно представлялись в виде таблиц со средними значениями скорости счета детекторов за 15-минутные интервалы. Для некоторых событий на отдельных станциях удавалось получить 5- или даже 1-минутные измерения (например, на станциях Оттава и Чикаго для события 23 февраля 1956 г.); данные об интенсивности ГКЛ перед GLE усреднялись за 1 час или сутки. С другой стороны, данные о солнечных индексах (число пятен SS, сумма их площадей, значения CI и др.) представлялись в форме таблиц со среднемесячными, среднесуточными или, в лучшем случае, часовыми значениями. Тем не менее, представляет большой интерес обработать и проанализировать такие архивные данные новыми перспективными методами. Для целей нашего анализа были отобраны четыре выдающихся события (в скобках приведены их порядковые номера в принятой ныне нумерации): 23 февраля 1956 г. (GLE05), 14 июля 2000 г. (GLE59), 28 октября 2003 г. (GLE65) и 20 января

2005 г. (GLE69). Данные наблюдений были взяты из имеющихся баз данных нейтронных мониторов, НМ (DataBase at World Data Center C, Japan; DataBase at World Data Center B, Russia).

Прежде всего, представляют интерес вариации интенсивности ГКЛ, а именно – возможная эволюция спектра мощности их флуктуаций, за несколько дней до момента конкретного GLE. Для анализа события 23 февраля 1956 г. были использованы данные НМ на г. Клаймакс (Канада), для трех остальных событий анализировались данные ст. Оулу (Финляндия). При этом решалась диагностическая задача – найти особенности (осцилляции) в поведении потоков ГКЛ накануне GLE и/или потоков СКЛ внутри временного интервала самих GLE. Это было сделано для того, чтобы связать их с известными осцилляциями других параметров СА (например, SS и CI, также исследованных в работе), или найти новые осцилляции, присущие самим событиям СКЛ. Наконец, были изучены осцилляции (флуктуации) в частоте генерации (наблюдения) GLE (η) на различных стадиях солнечного цикла. С этой целью временной ряд, состоящий из дат регистрации всех 70-ти GLE, был трансформирован в пространство “время–частота”, в так называемый ряд PWM (*Pulse Width Modulation*) [Holmes and Lipo, 2003], где приняты обозначения: 1 – есть событие GLE в данный день, 0 – нет события GLE в данный день. Следует, однако, оговориться, что временная шкала для большинства GLE исчисляется в минутах или десятках минут, тогда как шкала для солнечных индексов обычно гораздо длиннее. По этой причине, чтобы выполнить анализ когерентности GLE с другими явлениями СА, мы для всех временных рядов использовали суточную шкалу.

Полученные результаты об осцилляциях частоты событий СКЛ сопоставлялись, в первую очередь, с основной характеристикой СА – поведением числа солнечных пятен SS (<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>), которые широко используются в качестве индикатора тороидальных магнитных полей, солнечного динамо и солнечной активности в целом. Был использован также временной ряд для коронального индекса (CI) – меры суммарного солнечного излучения в зеленой корональной линии длиной 530.3 нм (Fe XIV). Важно отметить, что вариации индекса CI сравнимы с осцилляциями других подобных индексов для полного солнечного диска (соответствующие данные имеются на сайте Центра данных NOAA, Boulder, Co., USA: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/solintro.html>).

Чтобы обнаружить эволюционные изменения в спектре основных частот исследуемого ряда, мы в качестве “материнского” вэйвлета применили вэйвлет-трансформацию Морле (Morlet). Метод Морле служит полезным орудием для анализа ло-

кализованных вариаций в спектре плотности мощности флуктуаций внутри заданного временного ряда с большим набором частот. Это не может быть сделано с помощью классического Фурье-анализа, поскольку мы имеем дело с нестационарными временными рядами [Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997]. Когерентный вэйвлет-анализ является особенно перспективным для детального изучения тех временных и частотных интервалов, где два явления сильно взаимодействуют.

Уровень значимости когерентности двух временных рядов на вэйвлет-спектрах (см. ниже) определяется только по значениям, находящимся внутри так называемого конуса влияния (COI, Cone of Influence). Как известно, из-за ограниченного объема статистики, как и при обычном спектральном анализе, ошибки будут иметь место на начальном и конечном участках спектра (краевые эффекты). Конус влияния — это граница области спектра, где краевые эффекты становятся существенными. Параметр COI определяется как интервал времени, в течение которого автокорреляция мощности спектра падает в e раз, причем за пределами этого интервала краевые эффекты становятся пренебрежимо малыми. Маски U -образной формы, соответствующие границам COI на всех рисунках разделов 3 и 4 очерчивают области с уровнем достоверности 95%.

Уровень статистической значимости глобального вэйвлет-спектра (спектра плотности мощности осцилляций) оценивался нами с учетом недавних достижений в получении теоретических вэйвлет-спектров для процессов белого и красного шума [Torrence and Compo, 1998]. На рисунках, приведенных в разделах 3 и 4, даны примеры временных рядов, подвергнутых анализу, приведены вэйвлет-спектры осцилляций некоторых параметров, показаны их спектры плотности мощности. Временные профили интенсивности КЛ приведены вверху на правых панелях; ниже показаны вэйвлет-спектры осцилляций; левые панели демонстрируют соответствующие спектры плотности мощности. Более светлые участки вэйвлет-диаграмм соответствуют осцилляциям с большой мощностью или с высокой когерентностью (I) между обоими спектрами. Густым черным цветом отражены осцилляции с малой интенсивностью или с низким уровнем когерентности (O). Уровень значимости спектра мощности отмечен на рисунках пунктирными линиями; они относятся к мощности спектра красного шума [Gilman et al., 1963] на уровне достоверности 95%. Напомним в связи с этим, что мощность красного шума растет с уменьшением частоты, т.е. с увеличением периода осцилляций [Grinsted et al., 2004].

Стрелками показаны фазовые соотношения между спектрами плотности мощности для двух

исследуемых временных рядов. Горизонтальные стрелки, направленные вправо (0°), соответствуют совпадению фаз, при их положительном линейном соотношении; горизонтальными стрелками, направленными влево (180°), отмечены ситуации с противоположными фазами, при их отрицательном линейном соотношении. Стрелки, попавшие в любой другой угол, соответствуют более сложной (нелинейной) связи между двумя явлениями [Velasco and Mendoza, 2008]. Модельный (аналоговый) временной ряд PWM позволяет выявить и исследовать когерентность и синхронизацию между частотой событий GLE и соответствующими рядами индексов SS и CI.

Ниже описываются результаты вэйвлет-анализа спектра осцилляций для четырех исследованных GLE. Наиболее детальные результаты (для примера) приведены для двух экстремальных событий GLE05 (23 февраля 1956 г.) и GLE69 (20 января 2005 г.). Затем приводятся результаты анализа частоты регистрации GLE η (по датам событий за весь период 1942–2006 гг.) и, наконец, излагаются результаты изучения когерентности и синхронизации величины η с данными о солнечных пятнах SS и корональном индексе CI. На всех приведенных ниже рисунках 1–9, рядом с каждой панелью (справа) показана условная шкала мощности глобального вэйвлет-спектра; пунктирной линией отмечена расчетная плотность мощности красного шума на уровне достоверности 95%. Как и в работах [Mendoza et al., 2006; Velasco and Mendoza, 2008; Velasco et al., 2008], в качестве модели красного шума нами использовалась модель авто-регрессии первого порядка — AR(1) (марковский процесс) — с характерным параметром $\alpha = 0.72$, выбранным в соответствии с рекомендациями [Torrence and Compo, 1998].

3. ОСЦИЛЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Прежде чем излагать основные результаты, отметим, что мы начали наш анализ с расчетов вэйвлет-диаграмм для осцилляций ГКЛ с упреждением от 14-ти дней до 1-го дня перед конкретным GLE. Осцилляции ГКЛ до события СКЛ, очевидно, имеют диагностическое значение, так как они, в свою очередь, отражают состояние (степень возмущенности) межпланетной среды, где вскоре будут распространяться релятивистские протоны от Солнца. Естественно предположить, что в день события определяющая роль принадлежит СКЛ, причем их вклад в осцилляции будет тем больше, чем мощнее GLE (т.е., чем больше амплитуда возрастания потока СКЛ). В связи с этим, возникает вопрос: какую долю осцилляций по-прежнему можно отнести за счет ГКЛ в событиях GLE разной мощности? Можно ожидать, в частности, что в случае небольших GLE их вклад в общие осцилляции будет незначительным, по

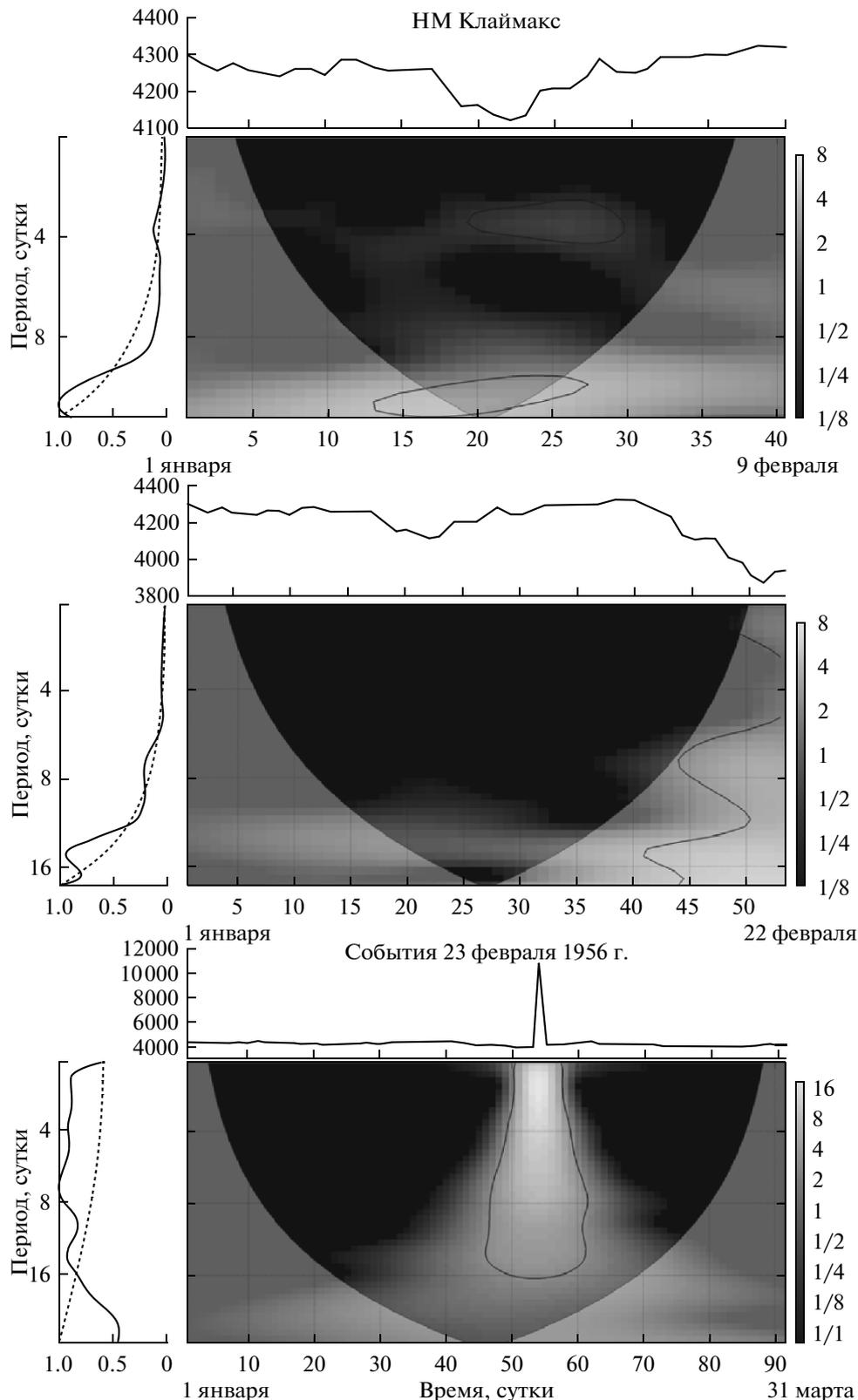


Рис. 1. Временные профили интенсивности и вэйвлет-спектры осцилляций ГКЛ за 14 дней до события 23 февраля 1956 г. (правая панель, верхняя пара графиков), за 1 день (средняя пара) и за весь изучаемый интервал 1 января–31 марта 1956 г., включая день самого GLE (нижняя пара). На левых панелях сверху вниз показаны соответствующие спектры мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в днях (ось ординат). Здесь и далее, пунктирной линией отмечена мощность красного шума на уровне достоверности 95%, а рядом с каждой панелью справа показана условная шкала мощности спектра;

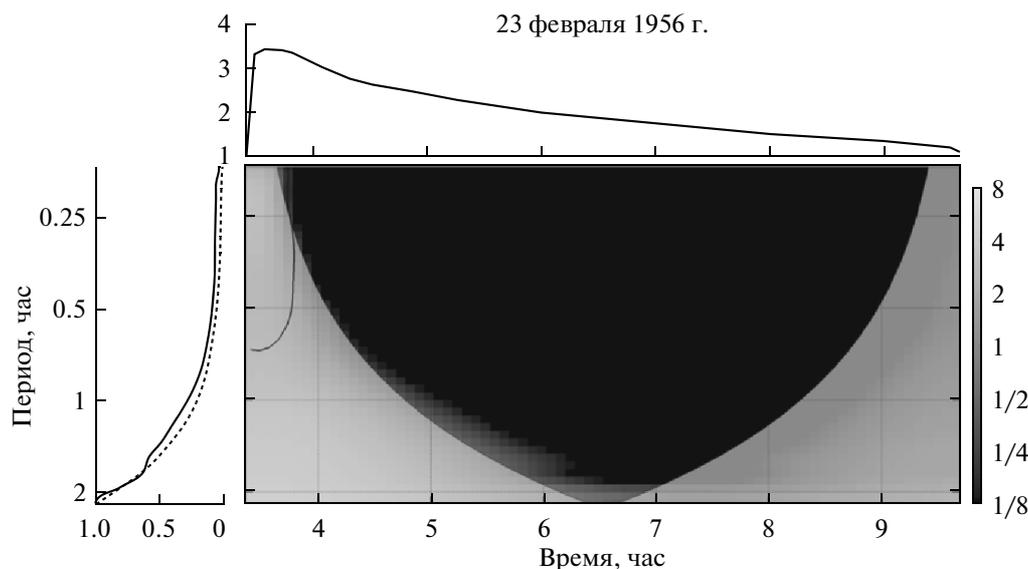


Рис. 2. Временной профиль интенсивности СКЛ (справа сверху) и вэйвлет-спектр осцилляций космических лучей в день события 23 февраля 1956 г. (внизу). Поток СКЛ по оси ординат указан в произвольных единицах, время по оси абсцисс отсчитывается в часах от момента начала события; периоды осцилляций (ось ординат) выражены в часах. Слева – спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода (ось ординат в часах).

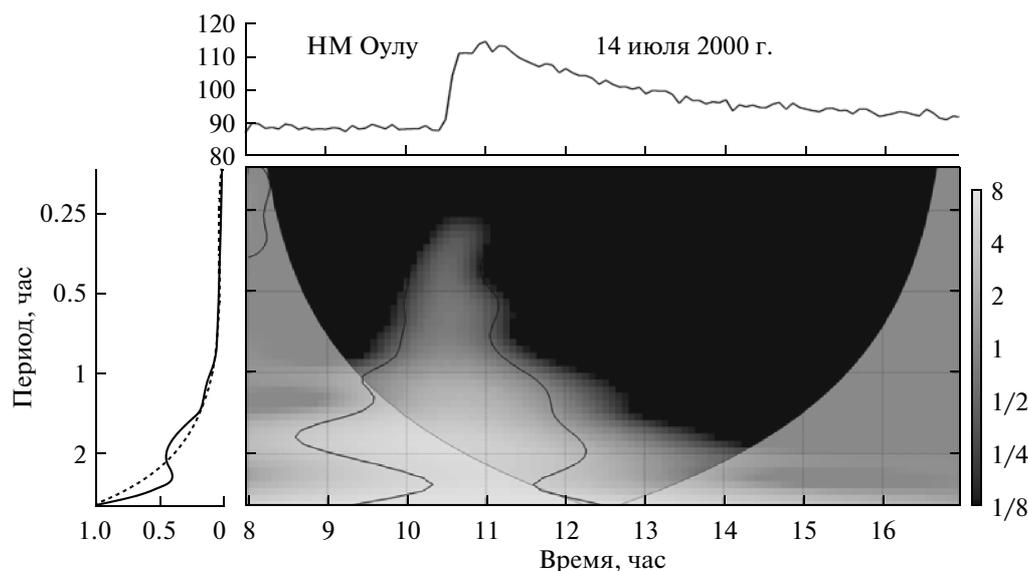


Рис. 3. Временной профиль (вверху) и вэйвлет-диаграмма осцилляций потока СКЛ 14 июля 2000 г. (внизу); поток СКЛ на ст. Оулу (ось ординат) указан в произвольных единицах, время (ось абсцисс) отсчитывается в часах; периоды осцилляций (ось ординат) выражены в часах. Слева – спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода (ось ординат в часах).

крайней мере, по наблюдениям на поверхности Земли. В случае очень мощных GLE ситуация может оказаться противоположной.

С другой стороны, временной профиль интенсивности СКЛ и мощность GLE зависят от ряда причин, которые не имеют прямого отношения к формированию события на Солнце (например, от гелиодолготного расстояния между положениями вспышки и точки наблюдения, от геомагнит-

ной жесткости обрезания и асимптотического конуса приема регистрирующей станции и др.). Отсюда следует, что вид вэйвлет-диаграмм может зависеть от выбора событий, а также от положения и количества станций, отобранных для изучения данного события. Вместе с тем, представляется вероятным, что, по крайней мере, накануне мощных GLE в поведении осцилляций ГКЛ будут проявляться какие-то схожие характеристики,

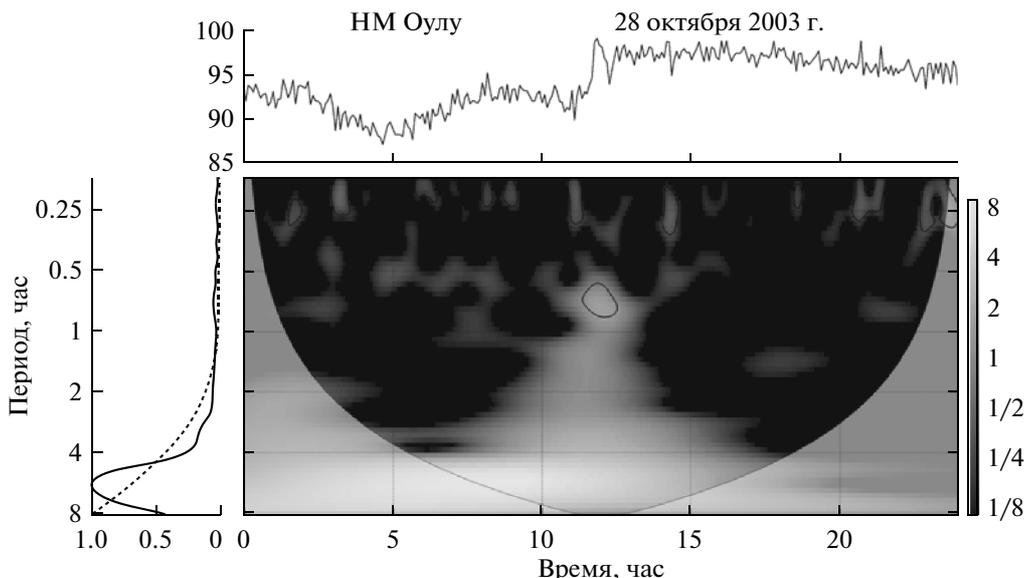


Рис. 4. Временной профиль (вверху) и вэйвлет-диаграмма осцилляций потока СКЛ 28 октября 2003 г. (внизу); поток СКЛ на ст. Оулу (ось ординат) указан в произвольных единицах, время (ось абсцисс) отсчитывается в часах. Слева — спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода (ось ординат в часах).

которые могут иметь прогностическую ценность для методик предсказания GLE. При этом высокая точность регистрации ГКЛ и СКЛ мировой сетью НМ позволяет изучать осцилляции с периодами ≤ 1 сут, в отличие от данных о солнечных индексах (например, SS и CI), которые измеряются в лучшем случае 1 раз в сутки, что ограничивает изучение осцилляций.

Вместе с тем, как показал наш анализ (см. ниже раздел 4), несмотря на отмеченные ограничения, солнечные индексы SS и CI оказываются полезными для изучения связи (когерентности и синхронизации) между частотой GLE η и уровнем SA на больших интервалах времени. Получаемые при этом сведения могут иметь определенную ценность для предсказания, по крайней мере, крупных событий GLE. Таким образом, в нашем исследовании, пользуясь техникой вэйвлет-анализа, мы реализуем комплексный подход к поиску осцилляций различных периодов и в различных рядах данных (ГКЛ, СКЛ, SS и CI), которые могут иметь отношение к подготовке и реализации события СКЛ.

Событие 23 февраля 1956 г. На рисунках 1, 2 показана эволюция спектра осцилляций ГКЛ до и во время события GLE05, зарегистрированного после вспышки 23 февраля 1956 г. (ее гелиокоординаты 23° N, 80° W и мощность 3 балла). Анализ проводился по 5-минутным данным ст. Клаймакс (ось ординат в единицах скорости счета нейтронного монитора) для трехмесячного интервала с 1 января по 31 марта 1956 г. (91 день), время дискретизации составляло 1 день. Для построения

конкретных вэйвлет-диаграмм были выбраны три интервала: 1) 1 января—9 февраля, т.е. за 14 дней до события; 2) 1 января—22 февраля, т.е. за 1 день до прихода СКЛ; 3) последняя пара графиков (внизу справа) построена для всего интервала — с 1 января до 31 марта, включая день самого GLE.

Верхние панели рис. 1 показывают временные профили интенсивности КЛ, включая приход потока СКЛ от вспышки 23 февраля 1956 г.; нижние панели представляют собой вэйвлет-диаграммы осцилляций в интенсивности частиц. Абсцисса отражает реальное время в днях, начиная с 1 января 1956 г.; значения периодов осцилляций по оси ординат слева показаны в днях. На левых панелях сверху вниз приведены соответствующие спектры плотности мощности флуктуаций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в днях (ось ординат). По двум верхним парам графиков можно проследить эволюцию периодов осцилляций во времени при переходе от интервала 1 января—9 февраля к интервалу 1 января—22 февраля: в спектре мощности заметна слабая тенденция к перекачке энергии от коротких периодов к более длинным, т.е. частота осцилляций уменьшается. Если рассматривать весь изучаемый интервал (с 1 января по 31 марта 1956 г.), то картина распределения мощности между периодами резко меняется. Из нижней пары графиков на рис. 1 можно видеть, что из-за вклада GLE спектр мощности носит сложный характер (квази-континуум), причем преобладают осцилляции с периодами короче 8-ми дней.

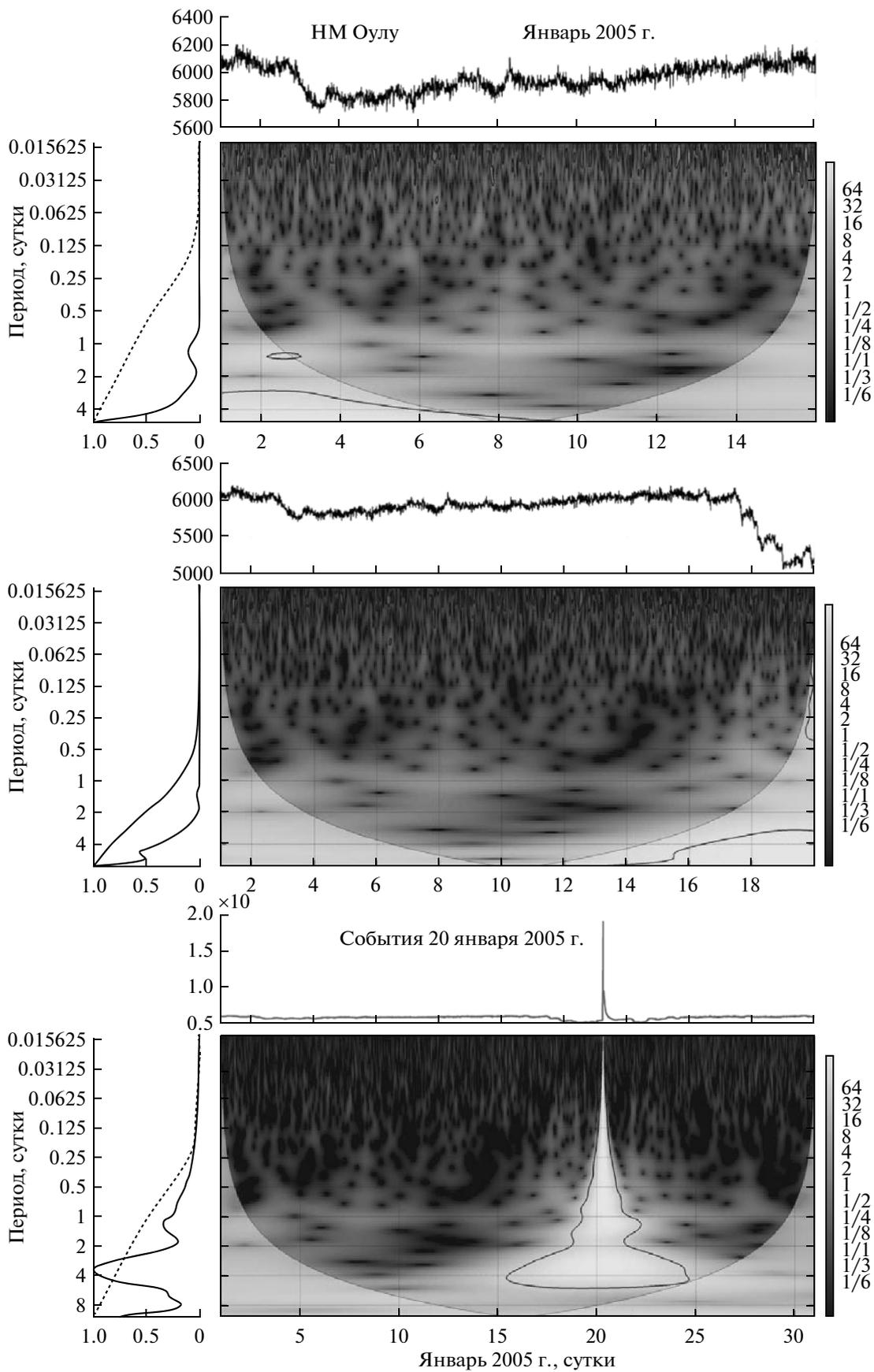


Рис. 5. Временные профили интенсивности и вэйвлет-спектры осцилляций ГКЛ за 5 дней до события GLE 20 января 2005 г. (левая панель, верхняя пара графиков), за 1 день (средняя пара) и в день самого GLE (нижняя пара) с учетом прихода мощного потока СКЛ. Графики интенсивности и вэйвлет-диаграммы по данным ст. Оулу (в единицах скорости счета нейтронного монитора) построены при различном временном разрешении; ось абсцисс показывает реальное время (дни января 2005 г.). На левых панелях сверху вниз показаны соответствующие спектры мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в днях (ось ординат).

Чтобы выделить эффект GLE/СКЛ, на рис. 2 (справа сверху) мы приводим временной профиль потока релятивистских солнечных протонов в день события 23 февраля 1956 г. и вэйвлет-спектр осцилляций суммарного потока ГКЛ и СКЛ (внизу); слева изображен спектр плотности мощности найденных осцилляций. Из этих графиков можно заключить, что во время события GLE05 характерные периоды флуктуаций КЛ были распределены плавно, начиная от ~ 15 мин и \sim до ≥ 2 ч. Такой диапазон периодов, скорее всего, означает, что во время GLE преобладающий вклад в осцилляции космических лучей вносят СКЛ. Правда, плотность мощности для всех указанных периодов лишь незначительно превышает расчетный уровень красного шума.

Событие 14 июля 2000 г. Анализ события GLE59 проводился по данным НМ ст. Оулу; соответствующая вспышка имела гелиокоординаты 22° N, 07° W, мощность $3B/X5.7$. Это событие часто называют также BDE (Bastille Day Event). Временные вариации потока релятивистских солнечных протонов в день самого события показаны на

рис. 3 справа сверху; внизу приведена вэйвлет-диаграмма осцилляций их потока; на левом графике изображен спектр плотности мощности осцилляций. Видно, что 14 июля 2000 г. наиболее значимый период флуктуаций СКЛ над уровнем красного шума составлял ~ 1.7 ч.

Событие 28 октября 2003 г. Как и в предыдущем случае (GLE59), анализ события GLE65 проводился аналогично по данным НМ ст. Оулу. Соответствующая вспышка имела гелиокоординаты 20° S, 02° E, мощность $4B/X17$. Результаты вэйвлет-анализа приведены на рис. 4 в таких же обозначениях и единицах, как и на рис. 3. Спектр плотности мощности (левый график) показывает, что 28 октября 2003 г. имели место осцилляции с периодами от ~ 15 до ~ 45 мин (при этом они незначительно превышали уровень красного шума), а также с периодом ~ 7 ч, причем последний пик оказался наиболее значимым.

Событие 20 января 2005 г. На рис. 5 приведены результаты детального вэйвлет-анализа осцилляций для события 20 января 2005 г. (GLE69). Соответствующая вспышка имела гелиокоординаты

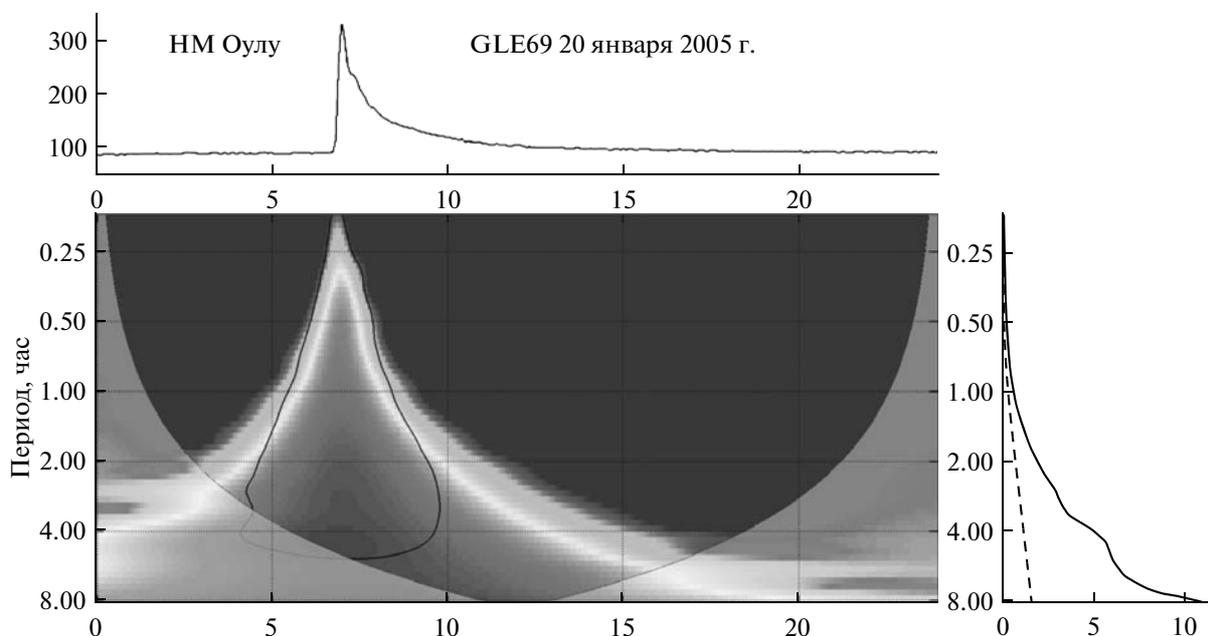


Рис. 6. Временной профиль интенсивности и вэйвлет-спектр осцилляций потока космических лучей в день события 20 января 2005 г. (левая панель). График интенсивности и вэйвлет-диаграмма построены по данным ст. Оулу (в произвольных единицах); ось абсцисс показывает реальное время в часах 20 января 2005 г.; периоды осцилляций (ось ординат) указаны в часах. На правой панели показан соответствующий спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в часах (ось ординат).

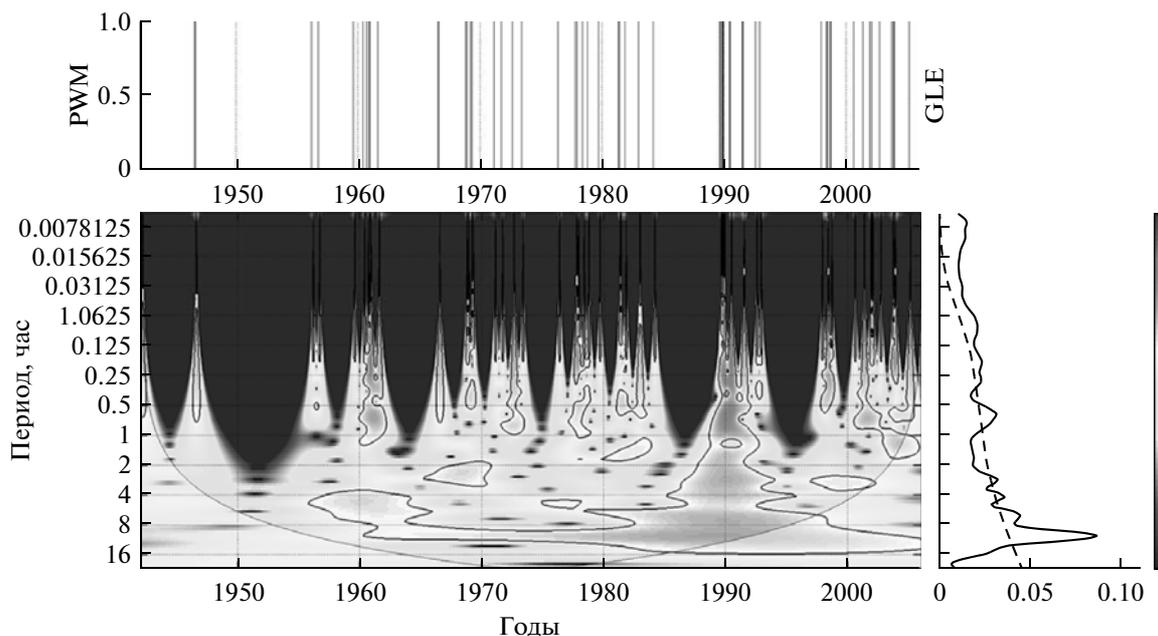


Рис. 7. Осцилляции частоты событий GLE. На верхней панели – временной ряд PWM для частоты GLE (построен методом Морле по датам регистрации 70-ти событий за 1942–2006 гг. [Perez-Peraza et al., 2009]); внизу – вэйвлет-диаграмма для спектра осцилляций (по оси ординат – периоды в долях года). Справа показан спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в долях года (ось ординат).

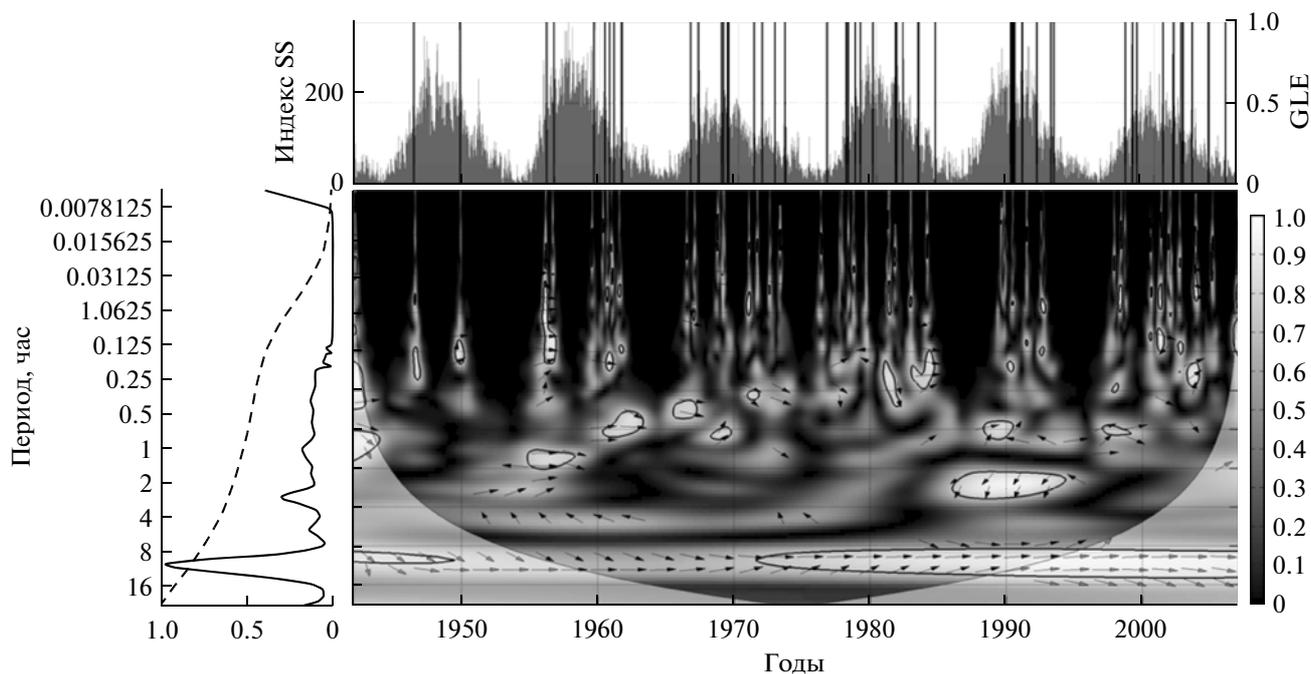


Рис. 8. Эволюция когерентности между PWM-рядом для частоты регистрации GLE (тонкие вертикальные линии на верхнем графике, шкала справа) и числом солнечных пятен SS (серая заливка, шкала слева). По оси абсцисс указан весь интервал наблюдений (годы). На левой панели приведен спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от их периода в долях года (ось ординат).

14° N, 61° W и мощность $2B/X7.1$, что несколько напоминает близкие характеристики вспышки 23 февраля 1956 г. Анализ проводился по данным

НМ ст. Оулу с различным временным усреднением, начиная с 10 мин. Анализируемый интервал составил 31 день (весь январь 2005 г.). Для постро-

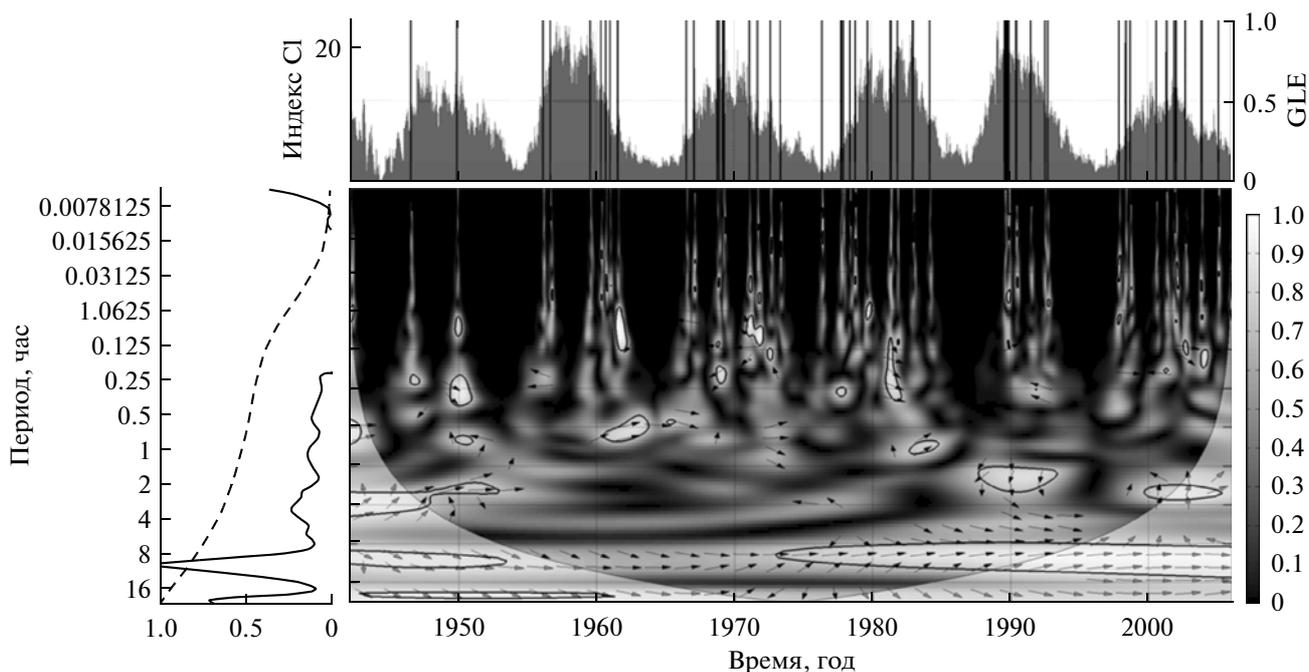


Рис. 9. Эволюция когерентности между PWM-рядом для частоты регистрации GLE (тонкие вертикальные линии на верхнем графике, шкала справа) и значением коронального индекса CI (серая заливка, шкала слева). По оси абсцисс указан весь интервал наблюдений (годы). На левой панели приведен спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от их периода в долях года (ось ординат).

ения конкретных вэйвлет-спектров были выбраны три интервала: 1) 1–14 января, т.е. за 5 дней до события; 2) 1–19 января, т.е. за 1 день до прихода СКЛ; 3) последняя пара графиков (внизу справа) построена для всего интервала – с 1 января до 31 января, включая день самого GLE. Верхние кривые на правых панелях соответствуют временным профилям интенсивности КЛ, включая возрастание интенсивности СКЛ 20 января 2005 г.; нижние диаграммы представляют собой вэйвлет-спектры осцилляций в интенсивности частиц. Абсцисса отражает реальное время в днях января, значения периодов (ось ординат слева) показаны в днях. На левых панелях сверху вниз изображены соответствующие спектры плотности мощности флуктуаций (осцилляций) в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в днях (ось ординат). Как и в случае GLE05, периоды осцилляций на рис.5 слева обнаруживают тенденцию к увеличению по мере приближения дня события. Вместе с тем, в отличие от события 23 февраля 1956 г. (рис. 1 слева), накануне события GLE69 (за 5 дней и за 1 день) спектры плотности мощности осцилляций ГКЛ лежат значительно ниже уровня красного шума. Если же рассматривать весь изучаемый интервал (1–31 января 2005 г.), то можно видеть (нижняя пара графиков), что из-за вклада GLE/СКЛ спектр мощности имеет преобладающий пик вблизи периода ~ 3.5 ч.

На рисунке 6 (левая панель) в более крупном масштабе показаны временной профиль интен-

сивности СКЛ (вверху) и вэйвлет-спектр осцилляций их потока (внизу) в день события GLE69. График интенсивности и вэйвлет-диаграмма построены по данным НМ ст. Оулу (в произвольных единицах); ось абсцисс показывает реальное время в часах 20 января 2005 г.; периоды осцилляций (ось ординат) приведены в часах. На правой панели показан спектр плотности мощности осцилляций в произвольных единицах (ось абсцисс) в зависимости от периода в часах (ось ординат). Из рисунка 6 можно сделать вывод, что в день рассматриваемого события спектр мощности осцилляций имел вид довольно плавной кривой, охватывающей периоды от ≤ 1 ч до ~ 8 ч. При этом, в отличие от другого экстремального события GLE05, график плотности мощности лежит значительно выше кривой для расчетного красного шума.

По итогам проведенного нами анализа для четырех событий GLE можно видеть, что периоды (частоты) осцилляций ГКЛ эволюционируют со временем. Эволюция начинается с низких значений периода (больших значений частоты) за несколько дней до события GLE; по мере приближения дня события период увеличивается (частота уменьшается). Подобного поведения периодов (частот) не обнаруживается в контрольные периоды, т.е. за пределами интервалов регистрации самих GLE, по крайней мере, для изученных нами четырех экстремальных событий. При этом характерные периоды осцилляций формируются для каждого события с различной заблаговремен-

ностью. Например, в случае GLE05 это происходило с упреждением от 14-ти дней до 1-го дня; а в случае GLE69 – от 4-х дней до нескольких часов. В день самих событий все периоды (частоты) осцилляций присутствуют одновременно, образуя своего рода “крылья” (квази-континуум) в области малых периодов (больших частот). Как уже упоминалось, появление больших частот может быть обусловлено преобладающим вкладом осцилляций потоков СКЛ. В целом, вэйвлет-анализ каждого из четырех GLE показывает, что во всех случаях в день события присутствуют осцилляции с различными периодами, причем большинство из них находится в диапазоне от ~15 мин до ~10 ч. Однако в целом результаты анализа осцилляций ГКЛ перед изученными четырьмя GLE носят ограниченный характер. Чтобы достоверно выяснить, насколько сильно спектры осцилляций ГКЛ изменяются именно перед приходом СКЛ, нужен анализ большего числа случаев. При этом надо выполнить также более детальный анализ контрольных периодов (в отсутствие GLE).

4. ЧАСТОТА РЕГИСТРАЦИИ GLE

В отличие от осцилляций ГКЛ, которые накануне GLE дают в основном диагностические сведения об условиях переноса ускоренных солнечных частиц в межпланетной среде, частота регистрации таких событий η – это совершенно другой аспект физики СКЛ. Как уже отмечалось выше (см. раздел 3), факт регистрации отдельного GLE отчасти может быть обусловлен условиями наблюдения. Однако 70-летний опыт изучения СКЛ показал, что параметр η определяется, в основном, вариациями временных свойств их генератора (Солнца). В связи с этим обсудим вопрос о частоте GLE несколько подробнее.

Как известно, первые GLE (до 1956 г.) регистрировались малым числом станций, которые были оборудованы приборами для измерений в основном одной лишь жесткой (мю-мезонной, или мюонной) компоненты – счетчиковыми мюонными телескопами (МТ) и ионизационными камерами (ИК). Эти стандартные детекторы на уровне моря имеют эффективные энергии ~15–20 и 25–35 ГэВ, соответственно, тогда как эффективная энергия регистрации для нейтронных мониторов составляет ~4–6 ГэВ [Miroshnichenko, 2001]. Отсюда вытекает, что нейтронные мониторы, по сравнению с МТ и ИК, оказываются более чувствительными к регистрации GLE. В настоящее время для идентификации GLE по данным мировой сети НМ применяется специальная методика [Shea and Smart, 1982; Vashenyuk et al., 2006], которая учитывает анизотропию прихода потока СКЛ к Земле, их круто падающий энергетический спектр и высокую чувствительность нейтронных мониторов. Вместе с тем, известно,

что некоторые слабые GLE (в пределах от ≥ 1 до 10%) регистрировались преимущественно на высокоширотных НМ или только на полярных станциях (см., например, [Kerpicova et al., 1982; Shea and Smart, 1987]).

Таким образом, можно уверенно предполагать, что в первые годы наблюдений СКЛ (до создания глобальной сети станций космических лучей) некоторые слабые события GLE не были зарегистрированы. При этом частота событий GLE, скорее всего, оказалась заниженной, так как некоторая доля событий по техническим и методическим причинам заведомо была пропущена. Судя по средней частоте GLE $\eta \sim 1.0$ в год, количество пропущенных событий за период 1942–1956 гг. могло быть значительным: действительно, из 14 ожидаемых “среднестатистических” событий до 1956 г. было зарегистрировано только четыре [Miroshnichenko and Perez-Peraza, 2008]. В итоге полный временной ряд (70 GLE) оказался обедненным слабыми событиями. С другой стороны, после GLE70 (13 декабря 2006 г., 23-ий цикл СА) и до GLE71 (17 мая 2012 г., текущий 24-ый цикл), т.е. уже более 5 лет, не наблюдалось ни одного подобного события. Аналогичная особенность в частоте регистрации GLE проявилась и в двух предыдущих циклах СА. Так, между GLE39 (16 февраля 1984 г.) и GLE40 (25 июля 1989 г.) прошло более 5-ти лет, а между GLE54 (2 ноября 1992 г.) и GLE55 (6 ноября 1997 г.) – почти 5 лет. Отметим, что хотя сильно затянувшийся минимум 23-его цикла СА завершился в декабре 2009 г., развитие 24-го цикла СА идет очень вяло, образование пятен, вспышечная и “протонная” активность Солнца в целом находятся на довольно низком уровне. Несмотря на отмеченные ограничения модельного (аналогового) PWM-ряда, некоторые закономерности в нем, тем не менее, обнаруживаются (рис. 7).

В верхней части рис. 7 показан аналоговый PWM-ряд суточных значений частоты GLE, построенный по датам их регистрации [Perez-Peraza et al., 2009] методом Морле; в нижней части приведена вэйвлет-диаграмма флуктуаций частоты событий; справа изображен спектр плотности мощности осцилляций η . Формально можно утверждать, что, в дополнение к хорошо известным периодичностям СА со средними и длинными периодами (0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 3.5, 7.0 и 11 лет), в спектре мощности обнаруживаются осцилляции η с периодами ~2.5, 5–8, 11, 22–30 и 60 дней. Однако фактически большинство этих периодов либо несут малую мощность, либо находятся вблизи или ниже кривой для мощности красного шума, так что статистически значимыми можно считать только периоды ~0.7, ~7.0 и ~11.0 лет. Ясно, что окончательные суждения по поводу значимости тех или иных пиков в спектре мощности могут сильно зависеть как от общей статистики GLE,

так и от выбранной модели красного шума [Togence and Compo, 1998].

Далее, на рисунках 8 и 9 мы представляем результаты вэйвлет-анализа когерентности между аналоговым PWM-рядом для η за весь период наблюдений (1942–2006 гг.) и обычными (цифровыми) временными рядами для суточных значений солнечных индексов SS и CI, соответственно. Из рисунка 8 (верхняя панель справа) можно видеть, в частности, что число GLE не следует амплитуде (высоте) цикла SA по числу пятен SS: например, относительно слабый цикл 23 имел больше событий СКЛ, чем гораздо более мощный цикл 22. Примерно такая же картина когерентности была обнаружена между частотой GLE и корональным индексом CI (рис. 9, верхняя панель справа). Исходя из анализа обоих спектров когерентности (левые панели рисунков 8 и 9), следует признать, что в обоих случаях контролирующей (доминирующей) является периодичность, связанная с 11-летним циклом SA, остальные периодичности попадают в область существенно ниже кривой достоверности для мощности красного шума. Как и следовало ожидать, более высокая частота регистрации событий СКЛ имеет место вблизи максимума солнечного цикла. С другой стороны, частота регистрации GLE, по-видимому, не зависит от амплитуды (высоты) солнечных циклов по числу солнечных пятен SS.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Недавно Kilcik et al. [2010] исследовали периодичности в поведении солнечного вспышечного индекса SFI (Solar Flare Index). Анализу подверглись данные, полученные для трех последних циклов SA: 1 июня 1976 г.–31 августа 1986 г. (цикл 21); 1 сентября 1986 г.–31 марта 1996 г. (цикл 22); 1 апреля 1996 г.–31 декабря 2007 г. (цикл 23). Были использованы два новых метода: 1) МТМ (Multi-Taper Method) [Percival and Walden, 1993] – метод многоконусности – с двумя аппроксимациями (для случая красного и белого шума); и 2) вэйвлет-трансформация Морле. Во всех изученных циклах SA на уровне значимости, по крайней мере, 90%, был найден период ~27 дней, который имеет очевидное происхождение (период солнечного вращения). Кроме того, были получены следующие четкие периоды: 152, 73 и 62 дня, соответственно, для 21-го, 22-го и 23-го циклов. При этом отмечается, что статистическая значимость найденных периодов зависит, однако, от применяемых методов анализа.

В настоящей работе нами впервые предпринята попытка строгими методами вэйвлет-анализа получить спектры осцилляций ГКЛ накануне прихода релятивистских солнечных протонов к Земле (события типа GLE), а также оценить когерентность (связь) некоторых характеристик SA с

частотой генерации η СКЛ на Солнце. Анализу подверглись данные о вариациях интенсивности ГКЛ и СКЛ за период 1942–2006 гг., а также суточные значения числа солнечных пятен SS и коронального индекса CI в циклах солнечной активности с 17-ого по 23-ий включительно.

Кроме осцилляций интенсивности ГКЛ, нами были изучены осцилляции индексов SS, CI и частоты событий GLE η . На примере четырех больших событий СКЛ (23 февраля 1956 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г.) показано, что по мере приближения дня GLE период (частота) осцилляций ГКЛ постепенно увеличивается (уменьшается). Это может служить определенным прогностическим признаком. Что касается осцилляций индексов SA, то в параметрах фотосферы (SS) и короны Солнца (CI), кроме хорошо известных ранее периодов SA (0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 3.5, 7 и 11 лет), обнаружено ряд кратковременных осцилляций [Perez-Peraza et al., 2009]. Среди найденных периодов наиболее выделяются периоды длиной 2.5, 5, 11, 22, 30 и 60 дней, причем все они, по-видимому, являются гармониками 11-летнего солнечного цикла. Таким образом, осцилляции SS, CI и ГКЛ подчиняются принципу иерархии.

По-видимому, совершенно другую природу имеют осцилляции частоты событий GLE. С помощью вэйвлет-анализа мы подтвердили здесь, что PWM-ряд для параметра η содержит статистически значимую осцилляцию с периодом ~11 лет. При этом оказалось, что осцилляции частоты GLE находятся в определенном сцеплении (когерентности) с временными рядами индексов (параметров) солнечной фотосферы (например, с числом солнечных пятен SS) и короны (например, с периодичностями в поведении коронального индекса CI). Вэйвлет-диаграммы когерентности показывают, что PWM-ряд событий GLE находится в фазе с временными рядами для солнечных индексов SS и CI в течение всего исследуемого периода (1942–2006 гг.). Несмотря на ограниченность статистики GLE и ограничения, налагаемые методами вэйвлет-анализа, полученные результаты могут представлять интерес для понимания периодических явлений в солнечном динамо, солнечной атмосфере, межпланетной среде и космических лучах.

Тенденция событий GLE группироваться в основном на восходящей и нисходящей ветвях солнечных циклов, по-видимому, обусловлена особенностями пространственно-временной структуры глобального магнитного поля (ГМП) Солнца. Как известно, как раз вблизи максимумов SA происходит его перестройка (смена знака). В связи с этим уместно отметить интересные результаты, полученные в работе [Nagashima et al., 1991]. Для анализа указанной тенденции

GLE эти авторы использовали данные мюонных телескопов и нейтронных мониторов для 43 GLE за период 1942–1990 гг. (конец 17-го—середина 22-го цикла). Ими было показано, что вспышки, вызывающие наземные возрастания СКЛ, по существу являются запрещенными во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака ГМП Солнца. Отсутствие GLE точно в максимуме СА (по крайней мере, для циклов 17–21) авторы [Nagashima et al., 1991] объясняют не угнетением процессов выхода СКЛ из-за сильных магнитных полей, а ухудшением эффективности ускорения частиц во время структурной перестройки ГМП в переходный период. Но уже в 22-ом цикле СА частота событий GLE резко возросла, а их число оказалось аномально большим (15). При этом 7 из них произошли в течение 5 месяцев по достижении максимума по параметру SS (июль 1989 г.), а остальные 8 наблюдались фактически в период изменения знака ГМП (1991–1992 гг.). Совершенно очевидно, что прежде чем делать определенные выводы, требуются дополнительные исследования. В частности, чтобы разделить эффекты ускорения и СКЛ и их выхода из солнечной атмосферы, необходимо исследовать структуру и динамику крупномасштабных магнитных полей в короне Солнца для индивидуальных событий типа 29 сентября 1989 г. (GLE42) [Miroshnichenko et al., 2000].

Поскольку некоторые периодичности, найденные в настоящей работе, являются когерентными для параметров η , SS и CI, на данной стадии нашего исследования мы можем сделать вывод, что имеет место синхронизация осцилляций в различных слоях солнечной атмосферы — от фотосферы до короны. Это может свидетельствовать о том, что генерация СКЛ является не локальным (изолированным) процессом, характерным исключительно для хромосферных или корональных структур, а затрагивает 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 по наблюдениям на одной или нескольких станциях нейтронных мониторов. Во всяком случае, мы можем предоставить программное обеспечение для вэйвлет-анализа данных по схеме Морле на одной или нескольких станциях (например, на ст. Оулу [Firoz et al., 2010]), где может быть осуществлен ежедневный контроль осцилляций ГКЛ. Таким способом можно было бы проверить принципиальную пригодность и эффективность предложенной методики предсказания GLE с заблаговременностью несколько дней. Пробный прогноз [Perez-Peraza et al., 2011] указывал, что очередного GLE71 сле-

дует ожидать между 12 декабря 2011 г. и 2 февраля 2012 г. Фактически GLE71 произошло 17 мая 2012 г. Оно оказалось небольшим (14–16% по 5-минутным данным НМ) и наблюдалось лишь на высоких широтах.

Уместно отметить, что аналогичный вэйвлет-анализ для числа солнечных пятен SS и потока ГКЛ [Christiansen et al., 2007] обнаружил значительную или даже сильную антикорреляцию между их осцилляциями за весь доступный интервал наблюдений, но только для периодов ≥ 7 лет; при меньших значениях периодов четкая корреляция (антикорреляция) между сигналами отсутствует. Иными словами, солнечные пятна SS могут служить хорошим индикатором вариаций ГКЛ только на больших временных масштабах. Распределение осцилляций ГКЛ может быть использовано для изучения солнечного цикла, прогноза солнечных протонных событий и других практических приложений в проблеме космической погоды.

Таким образом, благодаря новейшим методам вэйвлет-анализа нам впервые удалось наглядно продемонстрировать картину осцилляций потока ГКЛ накануне и в процессе событий СКЛ, а также показать тесную связь (когерентность) осцилляций солнечных индексов SS и CI с частотой GLE. При этом получены первые указания о возможной синхронизации процессов генерации СКЛ с периодическими процессами в солнечном динамо, солнечной атмосфере, межпланетной среде и галактических космических лучах. Вместе с тем, опыт подобных исследований солнечных и геофизических явлений показал, что применять технику вэйвлет-анализа следует с большой осторожностью и знанием всех возможных факторов, которые могут повлиять на вэйвлет-трансформацию исходного ряда данных. Для примера отметим результаты работы [De Moortel et al., 2004], в которой было отчетливо показано, что применение двух разных материнских вэйвлетов к анализу двух типов наблюдаемых солнечных осцилляций (по данным космического аппарата TRACE) приводит к сильно различающимся результатам.

Авторы весьма признательны рецензенту за ряд конструктивных критических замечаний, которые помогли существенно улучшить статью. Мы благодарим всех исследователей, чьи данные были использованы в настоящей работе, а также авторов соответствующего программного обеспечения для вэйвлет-анализа [Torrence and Compo, 1998], размещенного на сайте <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>. Работа выполнена при поддержке грантами Национального Автономного Университета (Мехико) DGAPA Grants PAPIIT: IN1170009, DGAPA: INI 19209-3, IXTLI: 0709013 и КОНАСИТ Мексики: 089887. Частичную поддержку оказал РФФИ (гранты № 07-02-01405, 08-02-92208, 09-02-98511, 11-02-08034). Работа была

поддержана целевой Федеральной научно-технической программой, а также Программой фундаментальных исследований РАН (ОФН-16) и грантами Президента Российской Федерации (НШ-8499.2006.2, НШ-4573.2008.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Вашенюк Э.В.* Закономерности в появлении событий с релятивистскими СКЛ // *Астрон. вестн.* Т. 34. № 2. С. 173–176. 2000.
- *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вэйллетный анализ и его приложения // М.: Физматлит, 176 с. 2003.
- *Мирошниченко Л.И.* Циклические вариации и спорадические флуктуации солнечных космических лучей // *Биофизика.* Т. 37. № 3. С. 364–377. 1992.
- *Перес-Пераса Х.А., Веласко-Эррера В.М., Запотитла Х., Мирошниченко Л.И., Вашенюк Э.В.* Поиск периодичностей в галактических космических лучах, солнечных пятнах и корональном индексе перед приходом релятивистских протонов от Солнца // *Изв. РАН. Сер. физическая.* Т. 75. № 6. С. 816–818. 2011.
- *Чуи К.* Введение в вэйлеты // М.: Мир, 412 с. 2001.
- *Christiansen F., Haigh J.D., Lundstedt H.* Influence of solar activity cycles on Earth's climate // *Executive Summary Report. ESTEC Contract no. 18453/04/NL/AR. Issue 1. September 5. 2007.*
- *De Moortel I., Munday S.S., Hood A.W.* Wavelet analysis: The effect of varying basic wavelet parameters // *Solar Phys.* V. 222. № 2. P. 203–228. 2004.
- *Firoz K.A., Cho K.-S., Hwang J. et al.* Characteristics of ground-level enhancement-associated solar flares, coronal mass ejections, and solar energetic particles // *J. Geophys. Res.* V. 115. A09105. doi:10.1029/2009JA015023. 2010.
- *Gilman D.L., Fuglister F.J., Mitchell Jr. J.M.* On the power spectrum of “red noise” // *J. Atmos. Sci.* V. 20. № 2. P. 182–184. 1963.
- *Grinsted A., Moore J., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlinear Proc. Geoph.* V. 11. № 5/6. P. 561–566. 2004.
- *Holmes D.G., Lipo T.A.* Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice. International: USA, Canada, Europe, Australia, Asia: Wiley and Sons. Inc. 724 p. 2003.
- *Kepicova O., Miroshnichenko L.I., Stehlik M.* Analysis of solar cosmic ray increases of September 1977 based on ground-level data // *Phys. Solariterrestris. Germany. Potsdam.* № 19. P. 40–52. 1982.
- *Kilcik A., Özgüç A., Rozelot J.P., Ataç T.* Periodicities in solar flare index for cycles 21–23 revisited // *Solar Phys.* V. 264. P. 255–268. DOI 10.1007/s11207-010-9567-7. 2010.
- *Kumar P., Foufoula-Georgiou E.* Wavelet analysis for geophysical applications // *Rev. Geophys.* V. 35. № 4. P. 385–412. doi:10.1029/97RG00427. 1997.
- *Mendoza B., Velasco V.M., Valdes-Galicia J.F.* Mid-term periodicities in the solar magnetic flux. *Solar Phys.* V. 233. № 2. P. 319–330. 2006.
- *Miroshnichenko L.I.* Solar cosmic rays. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 480 p. 2001.
- *Miroshnichenko L.I.* Radiation hazard in space. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 238 p. 2003.
- *Miroshnichenko L.I.* Radiation field formation and monitoring beyond LEO // *Adv. Space Res.* V. 36. № 9. P. 1742–1748. 2005.
- *Miroshnichenko L.I., de Koning C.A., Pérez-Enríquez R.* Large solar event of September 29. 1989: Ten years after (Review) // *Space Sci. Rev.* V. 91. P. 615–715. 2000.
- *Miroshnichenko L.I., Pérez-Peraza J.* Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays // *Int. J. Mod. Phys. A.* V. 23. № 1. P. 1–141. 2008.
- *Nagashima K., Sakakibara S., Morishita I.* Quiescence of GLE-producible solar proton eruptions during the transition phase of heliomagnetic polarity reversal near the solar activity-maximum period // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 43. № 8. P. 685–689. 1991.
- *Percival D.B., Walden A.T.* Spectral Analysis for Physical Applications – Multitaper and Conventional Univariate Techniques. Cambridge: Cambridge University Press, 580 p. 1993.
- *Percival D.B., Walden A.T.* Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 583 p. 2000.
- *Pérez-Peraza J., Velasco V.M., Zapotitla J., Vashenyuk E.V., Miroshnichenko L.I.* Pulse Width Modulation Analysis of Ground Level Proton Events / *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf., Lodz, Poland, 7–15 July 2009 (ID 1411, CD-ROM). 2009.*
- *Pérez-Peraza J., Velasco-Herrera V., Zapotitla J., Miroshnichenko L.I., Vashenyuk E.V., Libin I.Ya.* Classification of GLEs as a function of their spectral content for prognostic goals // *Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf., Beijing, China, 11–18 August 2011. V. 10. P. 149–152. 2011.*
- *Reames D.V.* Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere // *Space Sci. Rev.* V. 90. P. 413–491. 1999.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Possible evidence for a rigidity-dependent release of relativistic protons from the solar corona // *Space Sci. Rev.* V. 32. № 1/2. P. 251–271. 1982.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Relativistic solar proton events during the SMY-SMA // *Solar Maximum Analysis.* Eds. V.E. Stepanov, V.N. Obridko. Utrecht, The Netherlands: VNU Science Press. P. 309–314. 1987.
- *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. American Meteorol. Soc.* V. 79. P. 61–78. doi:10.1175/1520-0477. 1998.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Miroshnichenko L.I.* Some features of the sources of relativistic particles at the Sun in the solar cycles 21–23 // *Adv. Space Res.* V. 38. № 3. P. 411–417. 2006.
- *Velasco V.M., Mendoza B.* Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena // *Adv. Space Res.* V. 42. P. 866–878. 2008.
- *Velasco V.M., Mendoza B., Valdes-Galicia J.F.* The 120-yr solar cycle of the cosmogenic isotopes / *Proc. 30th Int. Cosmic Ray Conf. Mexico, Merida, Yucatan, 3–11 July 2007.* Eds. Caballero R., D'Olivo J.C., Medina-Tanco G., Nellen L., Sánchez F.A., Valdés-Galicia J.F. V. 1. P. 553–556. 2008.