
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОГЕНЕЗ
И 27-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. Е. А. Шарков, В. В. Афонин

Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: e.sharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2011 г.

На основе разработанной и накопленной по дистанционным наблюдениям в ИКИ РАН детальной базы данных, содержащей временные ряды интенсивности тропического циклогенеза за 19 лет — с 1983 по 2001 гг. — и анализа архивных данных по индексу солнечной активности F10.7 показано, что в частотно-временных спектрах годовых рядов наблюдается отклик глобального циклогенеза на внешнее воздействие с 27-суточным периодом солнечной активности на частотах, близких к этой вынуждающей частоте, а также на ее второй гармонике и субгармониках. В спектрах, усредненных за 19 лет в области характерных временных масштабов циклогенеза $S = 10\text{--}80$ сут, наиболее яркой компонентой является $S = 27$ сут, практически всегда наблюдаемой в циклогенезе Северного полушария. В Южном полушарии максимальный отклик чаще всего наблюдается на частотах, близких к гармоникам и субгармоникам основной частоты $f = 13.5 \text{ год}^{-1}$.

Ключевые слова: глобальный тропический циклогенез, солнечная активность, вейвлет-анализ

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что тропическая зона глобальной системы океан-атмосфера играет ключевую роль в динамике и эволюции синоптических и климатических метеорологических процессов на Земле. В этой связи любое внешнее (по отношению к тропосфере) энергетическое воздействие (и в первую очередь от Солнца) может иметь критическое значение для вариаций динамических и термодинамических структурных составляющих тропической зоны земной атмосферы. В первую очередь это относится к таким сложным метеообъектам в тропиках, как катастрофические атмосферные вихри — тропические циклоны (ТЦ). Внимание к исследованию таких систем объясняется целым рядом обстоятельств. С одной стороны, эти атмосферные процессы представляют собой непосредственную физическую опасность для человека и сопровождаются значительным материальным ущербом, а также возникающими при этом административно-социальными проблемами (Sharkov, 1998; Pielke, 1997). С другой стороны, катастрофические атмосферные вихри — своеобразный механизм эффективного сброса избыточного тепла в тропической атмосфере в условиях, когда действие обычных механизмов, основными из которых являются турбулентная конвекция и глобальная циркуляция, становится явно недостаточным. Таким образом, катастрофические явления играют важную роль при установлении климатического температурного режима Земли (парнико-

вый эффект), отводя излишнее тепло и способствуя предотвращению чрезмерного перегрева планеты в тропической зоне. Проблемы усугубляются невозможностью уверенного прогнозирования как генезиса, так и эволюции этих явлений с удовлетворительной степенью надежности современными теоретическими моделями (Sharkov, 1998; 2000). Более того, в теоретическом секторе исследования таких геофизических систем наблюдается серьезное кризисное состояние, обусловленное сменой основных теоретических концепций. Поэтому детальные экспериментальные исследования пространственно-временной структуры циклогенеза, включающей как детерминированные (например сезонные), так и стохастические составляющие процесса, представляют несомненный интерес (Sharkov, 2000). При этом, разумеется, темой особого исследования должен быть поиск составляющих (как стохастического, так и детерминированного типа) общего сложного процесса, которые могут определяться внешними энергетическими воздействиями и в первую очередь обусловлены вариациями солнечной активности. Солнечная энергия втекает в атмосферу как непосредственно, в форме электромагнитного излучения, так и от солнечных энергичных частиц путем многочисленных солнечно-магнитосферно-ионосферно-тропосферных взаимодействий. Поскольку земная атмосфера представляет собой сложную термо-аэродинамическую систему со сложными и нелинейными передаточными характеристиками, то можно предположить, что

глобальный тропический циклогенез (ГТЦ) может отражать связи как с прямыми индикаторами солнечной активности, так и с индикаторами геомагнитной активности. В течение длительного времени, начиная с конца XIX в. (Meldrum, 1872) по настоящее время (Dickenson, 1975; Tsiropoula, 2003), исследователями предпринимались неоднократные попытки установления корреляционных связей (различными способами – от прямого сопоставления (Meldrum, 1872; Чижевский, 1976) до спектральной (Cohen, Sweetser, 1975) и кросс-корреляционной обработок) между возникновением тропических циклонов (в отдельных регионах Мирового океана) и солнечной (количество солнечных пятен) и магнитосферной активностью. Однако эти попытки не привели к однозначно и физически наглядно интерпретируемым результатам. Причины такого положения связаны (как теперь становится ясно) с многомасштабностью и нелинейностью процесса взаимодействия солнечной активности и циклогенеза, и по этим причинам стандартные кросс-корреляционные подходы, широко используемые при обработке временных рядов наблюдаемых явлений, не могут в принципе привести к положительным результатам, поскольку обрабатываемые стохастические временные ряды были представлены как совокупность таких событий, как дельта-функции.

В настоящей работе представлены результаты детального анализа спектральных особенностей стохастических временных рядов глобального тропического циклогенеза и наиболее широко используемого индекса солнечной активности F10.7 (поток радиоизлучения на частоте 2800 МГц, $\lambda = 10.7$ см) при помощи специального многомасштабного вейвлет-анализа. Особое внимание авторы уделяют исследованию отклика глобального циклогенеза (а также циклогенеза Северного и Южного полушарий) на внешнее воздействие солнечной активности с 27-суточным периодом на частотах, близких к этой вынуждающей частоте, а также на ее второй гармонике и субгармониках.

Первые результаты работы были доложены на международной конференции, посвященной памяти Ю. Гальперина (Afonin, Sharkov, 2003).

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА

В настоящее время исследование генезиса и эволюции устойчивых вихревых систем на фоне турбулентного хаоса тропической атмосферы развивается в двух принципиальных направлениях (Sharkov, 2000):

– “локальный” подход (индивидуальный циклогенез), используемый при исследовании образования единичной (индивидуальной) вихревой структуры из турбулентного хаоса в условиях ло-

кальной и сильной неравновесности системы океан–атмосфера;

– “глобальный” подход (множественный циклогенез), рассматривающий образование вихревых систем в акватории Мирового океана как совокупности центров релаксационной генерации в активной среде природной системы океан–атмосфера (при этом последняя рассматривается в глобальном масштабе).

Изучению индивидуального циклогенеза посвящено целое направление как теоретических, так и экспериментальных работ. Теоретические работы при этом развиваются на базе привлечения целого спектра достаточно разнообразных подходов, начиная от динамических моделей, до идей самоорганизации (спиральный механизм) и до альтернативного – термодинамического направления исследований в проблеме генезиса атмосферных катастроф. Тропический же циклогенез, рассматриваемый в глобальном аспекте, остается достаточно слабо изученным физическим процессом, хотя на основе предложенной концепции множественного циклогенеза уже получены серьезные и нетривиальные результаты (Sharkov, 2000). Очевидно, что структурным фундаментом исследований множественного циклогенеза должна служить методика построения временного ряда глобального тропического циклогенеза – физического процесса, рассматриваемого одновременно на всей акватории Мирового океана (или по региональным акваториям полушарий). Несомненно, вопрос о методологии построения временного ряда ГТЦ является принципиально важным, поскольку от его концептуального решения зависит физическая значимость конечного результата.

Временной поток неразличимых событий (полная эволюция ГТЦ) с учетом времени жизни каждого индивидуального события будет строиться (Sharkov, 2000; Покровская, Шарков, 2006) следующим образом. Не интересуясь детальной структурой и динамикой каждого индивидуального тропического образования, будем представлять на временной оси каждое тропическое возмущение как импульс единичной амплитуды со случайной длительностью (соответствующей времени функционирования ГТЦ) и случайными моментами появления (генерации индивидуального ГТЦ). Число поступивших импульсов (событий) в единичном временном интервале (u нас сутки) является в таком случае естественным физическим параметром – интенсивностью глобального циклогенеза, определяющего энергетику взаимодействия океан–атмосфера.

Математически предложенную процедуру формирования сигнала можно записать следующим образом:

$$I(t) = \sum_{i=1}^N \Xi(t - t_i; \tau_i), \quad (1)$$

где $I(t)$ — интенсивность циклогенеза; N — число ТЦ, появившиеся в течение года; Ξ — ограниченная функция Хэвисайда

$$\Xi(t - t_i; \tau_i) = \begin{cases} 1 & t_i < t < t_i + \tau_i, \\ 0 & t_i + \tau_i < t < t_i. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь τ_i — время продолжительности жизни (существования) отдельного ТЦ; t_i — время его формирования (образования); $t_i + \tau_i$ — время его диссипации.

Сформированная подобным образом последовательность импульсов есть не что иное, как целочисленный случайный временной поток неразличимых событий. Таким образом, мы базируемся на представлении временной последовательности интенсивности глобального тропического циклогенеза как статистического сигнала сложной структуры. Несмотря на то, что предлагаемый подход — один из вариантов формирования сигнала, он, тем не менее, позволил существенно продвинуться в понимании стохастической структуры ГТЦ (Sharkov, 2000).

Экспериментальные геофизические данные о возникновении временной и пространственной эволюции ТЦ по акваториям Мирового океана были заимствованы из систематизированной базы данных “Глобал-ТЦ” (Покровская, Шарков, 2006), где хронологические, гидрометеорологические и кинематические характеристики крупномасштабных тропических возмущений на всей акватории Мирового океана представлены в виде последовательности событий за исследуемый период — с 1983 по 2001 гг. Дальнейшие исследования (Sharkov, 2000) показали, что вероятностная структура флуктуаций амплитуды исследуемого потока действительно близка к структуре потока пуассоновского типа при наличии, однако, определенных (и весьма симптоматичных) отклонений от пуассоновского модели при увеличении временного масштаба наблюдения. Именно эти отклонения от пуассоновской модели и несут на себе информацию о многомасштабности и нелинейности системы.

Солнечно-геофизические параметры (глобальные индексы геомагнитной возмущенности Dst, число солнечных пятен Z , индекс активности Солнца F10.7) были заимствованы из известных сайтов Интернета.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Как мы уже отмечали, принципиальной особенностью работы является использование специализированного (вейвлет) спектрального ана-

лиза одновременно для двух временных рядов сигналов — интенсивности циклогенеза и вариаций радиоизлучения Солнца — с последующим сопоставлением и анализом полученных вейвлет-диаграмм (ВД). В настоящее время вейвлет-преобразование (ВП) широко применяется для распознавания образов, обработки и синтеза изображений и сигналов различной природы, изучения свойств турбулентных полей и многих других целей.

ВП состоит в разложении исходного анализируемого сигнала по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета), посредством масштабных преобразований и сдвигов (Chui, 1992). Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную временную частоту, так и ее локализацию во времени. В отличие от обычно применяемого для анализа спектральных свойств сигналов преобразования Фурье ВП обеспечивает двумерную (частота–время) развертку исследуемого одномерного сигнала. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала (процесса) одновременно и в физическом (время), и в спектральном (частота) пространствах.

Как уже отмечалось, ВП состоит в разложении анализируемой функции (сигнала) по базису, сконструированному из солитоноподобной функции $\Psi(t)$.

Непрерывное ВП (двумерная ВД) $W(a, b)$ одномерной функции $f(t)$ имеет вид

$$W(a, b) = a^{-1/2} \int \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt. \quad (3)$$

Разложение анализируемого сигнала по масштабам осуществляется растяжением или сжатием анализирующего вейвлета перед его сверткой с сигналом. Известно, что картина ВП слабо зависит от выбора анализирующей функции, однако с помощью разных вейвлетов можно ярче проявить отдельные особенности анализируемого сигнала.

Представленные здесь результаты получены на основе вейвлета Морле, определяемого как произведение комплексной экспоненты и функции Гаусса

$$\Psi(x) = \pi^{-1/4} \exp(i\omega_0 x) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (4)$$

ВП позволяет выявить локализацию и интенсивность особенностей в сигнале, области локализованных периодичностей сигнала, области наибольшей активности процесса, иерархическую структуру анализируемого множества, дробление и слияние масштабов и т.п.

Ниже мы покажем, что ВП окажется весьма полезным и для анализа структуры процессов, происходящих в принципиально различных системах — геофизических и гелиофизических, — и с

дальнейшим выявлением корреляционных компонент.

Поскольку спектры ВП (ВП-спектры) принято воспринимать в большинстве работ в первую очередь как качественную характеристику, целесообразно провести количественную “калибровку” применяемого нами метода, или, иначе, ответить на вопрос о возможности получения количественных характеристик исследуемого стохастического процесса.

Калибровка метода проводилась с использованием модельного временного ряда

$$Y = 20 \sin\left(\frac{2\pi T}{5}\right) + 10 \sin\left(\frac{2\pi T}{27}\right) + 20 \sin\left(\frac{2\pi T}{54}\right), \quad (5)$$

где $T = 1-365$. Этот ряд содержит члены с временными масштабами 5, 27 и 54 сут и двумя амплитудами 10 и 20. Результаты ВП (мы использовали вейвлет Морле) этого ряда показаны на рис. 1 (см. на цветн. вклейках). На рис. 1а показан модельный временной ряд $Y(T)$ для периода времени в 365 сут (год). ВП-спектр мощности (нормированный на максимальное значение компонент спектра) показан на рис. 1б. ВП-спектр представляет собой частотно-временные вариации компонент сигнала. Амплитуда (в данном случае относительная мощность компонент) кодирована цветом (правая шкала на рис. 1б). Временная ось (ось абсцисс) соответствует суткам года (T). Ось частот (ордината $\lg f$) логарифмическая, минимальная частота $\lg f = 0$ в начале координат (внизу), максимальная частота $\lg f = 2.26$ – вверху. Для удобства две другие шкалы слева отображают соответствующие частоты между $f_{\min} = 1.0$ (период $T = 1$ год) и $f_{\max} = 182.5$ (период $T = 2$ сут, частота Найквиста данного ряда) и соответствующие им временные масштабы S в сутках. На рис. 1в представлено сечение ВП-спектра вдоль оси частот для фиксированного времени $T = 181$ -й день. Этот формат представления используется во всех последующих рисунках.

Как видно из самого спектра и сечения, применяемое нами ВП достаточно точно определяет частотные компоненты исходного сигнала, а также правильно отображает количественное соотношение между различными частотными компонентами исходного сигнала. Мощность сигнала с масштабом 27 сут в 4 раза меньше двух других компонент, в точном соответствии с отношением амплитуд (вейвлет-спектр нормирован на максимальную мощность).

Следует, однако, отметить, что в силу особенностей метода ВП в применении к рядам с конечным числом точек временное разрешение на малых частотах (внизу спектра) прогрессивно уменьшается (краевой эффект), что проявляется в размытии частотных “линий” при уменьшении частоты.

ГODOВАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ЦИКЛОГЕНЕЗА

Прежде чем исследовать изучаемые временные ряды при помощи специальных методов (вейвлет-анализа), целесообразно детально рассмотреть временную изменчивость солнечной активности (включая геомагнитную активность) и интенсивности циклогенеза стандартными методами – трендовыми, накопительными подходами и авто- и кросс-корреляционной обработкой.

Временной ход ежесуточных значений глобальной интенсивности циклогенеза $I(t)$, индекс активности Солнца F10.7 (10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹) и глобальный индекс геомагнитной возмущенности DST (в гаммах) в течение 19 лет (1983–2001 гг.) показаны на рис. 2а–в (на цветн. вклейках). На рис. 2г (там же) показана функция накопления $Z(t)$ временного ряда интенсивности циклогенеза (методика впервые предложена в (Sharkov, 2000)) и параметры линейных регрессий для функции накопления глобального циклогенеза и циклогенезов Северного и Южного полушарий. Совместный анализ временных рядов (рис. 2а–в) показывает, что, несмотря на ярко выраженную 11-летнюю вариацию активности Солнца (индекс F10.7 изменяется в ~5 раз), величина $I(t)$ не имеет явно выраженных временных трендов и остается практически постоянной (за исключением ярко выраженных полугодовых, сезонных вариаций). Более явно эту тенденцию можно наблюдать из временного ряда функции накопления (рис. 2г). Внизу под рисунком указаны коэффициенты корреляции R_{xy} и наклон регрессионных кривых ka . Функция накопления циклогенеза нарастает практически линейно со временем (коэффициент корреляции для глобальной интенсивности циклогенеза $I(t)$ равен 1.00 до 1996 г. и 0.998 после 1996 г.), что говорит о постоянной величине интенсивности пуассоновского процесса (Sharkov, 2000) (или, несколько упрощая ситуацию, о постоянной величине ежесуточной скорости образования ТЦ) и полном отсутствии межгодовых вариаций. Небольшие гармонические компоненты на кривых соответствуют полугодовым вариациям (более ярко они представлены на временном ряде рис. 2в). Наклон регрессионных кривых, величина ka (1/сут), физически представляет собой интенсивность пуассоновского процесса (дифференциальную скорость образования циклонов в сутки). Например, в течение 1983–1996 гг. ежесуточный дифференциальный темп рождения ТЦ на земном шаре составлял 1.719 циклонов в сутки, из них 1.264 – в Северном и 0.455 – в Южном полушариях. Изменение темпов генерации после 1996 г. (глобальный темп – 2.285 и соответственно для полушарий – 1.496 и 0.789) требует некоторого пояснения. Увеличение темпа скоро-

сти образования ТЦ можно было бы на первый взгляд связать с глобальными процессами на планете (так называемое “потепление” глобального климата), однако высокие значения коэффициентов корреляции (≥ 0.999 до 1996 г. и ≥ 0.990 после) свидетельствуют о постоянстве механизма генерации ТЦ, и поэтому изменение наклона кривых (скорости образования ТЦ) связано совсем с другим – а именно, с использованием более детальных подходов к систематике начальных форм ТЦ (см. более подробно в работе (Покровская, Шарков, 2006)) и значительным улучшением работы метеорологических служб слежения за ТЦ в связи с внедрением компьютерных технологий сети Интернет. В данном случае для нас важно, что в течение 19 лет отсутствуют какие-либо межгодовые вариации.

Рассмотрим вопрос о корреляции интенсивности циклогенеза $I(t)$ и солнечной активности F10.7 на больших масштабах времени (более 1 года). Чтобы ответить на этот вопрос, усредненные за год значения глобальных интенсивностей $I(t)$ для каждого года были сравнены с вычисленными аналогично значениями F10.7 и DST (рис. 3 на цветн. вклейках). Чтобы представить данные, на том же графике величины DST были умножены на -15 . На рис. 3в, г показаны диаграммы рассеяния (scatterplots) каждого из трех параметров циклогенеза (глобальный, север, юг) от F10.7 (рис. 3в) и DST (рис. 3г). Черные линии представляют соответствующие регрессии. Числа под линиями – коэффициенты корреляции, все они не превышают 0.210. Нетрудно видеть, что в больших масштабах времени, порядка нескольких лет, корреляция между $I(t)$ и солнечной и геомагнитной активностью, представленной индексами F10.7 и DST, отсутствует. Интересно отметить, что на рис. 3а можно выявить определенную тенденцию к, казалось бы, положительному тренду $I(t)$ за 19 лет. На самом же деле этот возможный тренд является артефактом, вызванным повышением ежегодного количества циклонов после 1996 г., обсуждавшимся выше (рис. 2) и, по-видимому, вызван теми же причинами.

Рассмотрим вопрос о корреляции интенсивности циклогенеза $I(t)$ и солнечной F10.7 и геомагнитной DST активности на годовом масштабе времени (при суточном усреднении). Временные ряды годовых вариаций (а) DST, (б) F10.7 и (в) $I(t)$ в Северном и (г) $I(t)$ в Южном полушариях для минимума (слева, 1997 г.) и максимума (справа, 2000 г.) солнечной активности показаны на рис. 4 (на цветн. вклейках). На рис. 4е показаны диаграммы рассеяния зависимости глобального количества $I(t)$ от F10.7 (рис. 4д, слева) и DST (рис. 4д, справа) для каждых суток года. Из анализа этих рисунков следует, что временные ряды суточных значений $I(t)$, F10.7 и DST не выявляют существенной корреляции. Коэффициент корреляции

для годовых рядов $I(t)$ и F10.7 (рис. 4д, слева) составляет -0.113 , а для годовых рядов $I(t)$ и DST (рис. 4д, справа) -0.225 . В тоже время временные ряды суточных значений $I(t)$ имеют ярко выраженную сезонную зависимость. Годовые максимумы $I(t)$ в Северном и Южном полушариях значительно разнесены по времени. В обоих полушариях максимумы $I(t)$ наблюдаются в течение летнего времени. Зимой ТЦ практически не наблюдаются. Интенсивность ТЦ в Южном полушарии меньше, чем в Северном. Различия в интенсивности циклогенеза в максимуме и минимуме солнечной активности не выявляются, тогда как наблюдаются известное резкое изменение вариаций радиоизлучения F10.7 и магнитосферной активности (рис. 4а, б).

АВТОКОРРЕЛЯЦИЯ ГОДОВЫХ РЯДОВ

Вопрос о соотношении стохастических или “организованные” процессов во временных рядах циклогенеза с точки зрения автокорреляции уже детально рассматривался (Sharkov, 2000). Здесь нас будет интересовать соотношение автокорреляционных характеристик циклогенеза и солнечной активности. На рис. 5 показаны вычисленные автокорреляционные функции временных рядов $I(t)$ и F10.7 для максимума и минимума солнечной активности. При вычислениях использовался циклический сдвиг исходных рядов, поэтому кривые симметричны относительно сдвига, равного половине года. Более правильным было бы расширить исходные ряды с обеих сторон за счет рядов для предыдущего и последующего годов, однако это незначительно изменило бы полученные результаты. Видно, что ряды $I(t)$ автокоррелируют лишь на временах, меньших 5 сут, т.е. они представляют собой последовательность короткоживущих событий без “истории”. При больших задержках взаимосвязь между величинами $I(t)$ отсутствует, и каждый ТЦ можно рассматривать как случайное событие, и таким образом можно сделать предварительное заключение о том, что возможные взаимодействия в процессе циклогенеза, превышающие 5 сут, не эффективны. С другой стороны, ряды величин F10.7 хорошо автокоррелируют с периодом 27 сут. Значимая 27-суточная автокорреляция сохраняется и во время минимума солнечной активности, хотя из анализа временного ряда это заключение непосредственно получить затруднительно (рис. 4а, б).

Таким образом, как корреляционные подходы, так и трендовый анализ, на первый взгляд, дают отрицательное заключение о влиянии солнечной активности на циклогенез. Однако более тонкий анализ (вейвлет-анализ) показывает, что на самом деле это не так.

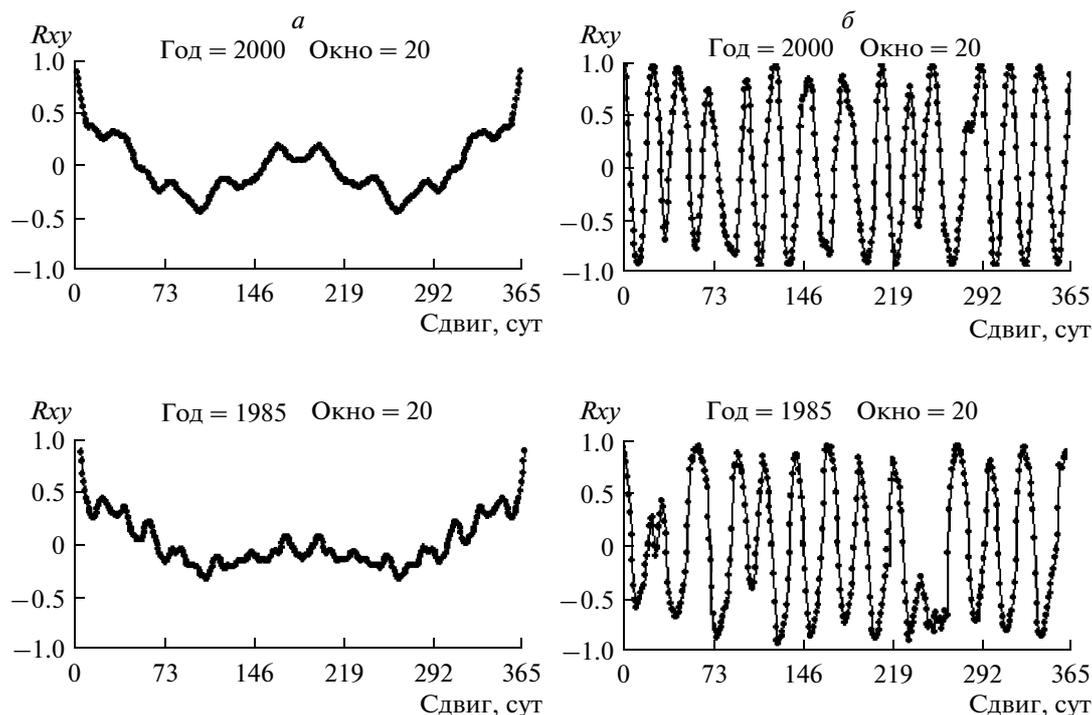


Рис. 5. Вычисленные автокорреляционные функции временных рядов: *a* – глобального циклогенеза $I(t)$ и *б* – $F10.7(t)$; для максимума (вверху) и минимума (внизу) солнечной активности.

ПОИСК 27-СУТОЧНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ЦИКЛОГЕНЕЗА

Несмотря на общепринятую точку зрения об основном энергетическом вкладе в циклогенез со стороны фазового перехода водяного пара (Шарков, 2010; Шарков и др., 2011), вопросы о спусковых (триггерных) механизмах далеки от разрешения. Одним из возможных спусковых механизмов могут быть вариации солнечной активности. Поиск 27-суточной периодичности во временных рядах циклогенеза производился с применением вейвлет-анализа.

Результаты ВП (ВП-спектры) глобального ряда интенсивности циклогенеза (слева) и параметра $F10.7$ (справа) длиной 1600 сут в максимуме 200 сут в минимуме СА показаны на рис. 6, 7 (на цветн. вклейках) соответственно. На всех ВД горизонтальные курсоры (горизонтальные линии) установлены на частоте $f = 13.5$, соответствующей 27-суточной компоненте, вертикальные – на определенные исследуемые сутки.

Общая структура ВП-спектра для интенсивности циклогенеза имеет весьма характерные особенности хаотизированных систем рассматриваемого класса (Sharikov, 2000). На малых временных масштабах процесс ведет себя как пуассоновский случайный сигнал, затем наступает нелинейная стадия, которая сопровождается нелинейными взаимодействиями (в том числе и буффрикацион-

ного типа). При больших временах система ведет себя как линейный гармонический осциллятор с ярко выраженными сезонными (годовые и полугодовые) вариациями. Все эти области хорошо выявляются на ВД интенсивности циклогенеза (рис. 6б, 7б). Что же касается солнечной активности, то на ВД в яркой форме выявляется только область нелинейных взаимодействий (вблизи частоты $f = 13.5$) со слабыми пуассоновскими ветвями. Никаких сезонных вариаций в солнечной активности, естественно, не наблюдается.

В вариациях $F10.7$ наличие компоненты $f = 13.5$ очевидно в обоих случаях, причем в год максимума она проявляется наиболее отчетливо. Спектральные максимумы не всегда лежат точно на линии $f = 13.5$, но весьма близки к ней. Изменение амплитуды этой компоненты довольно значительны. Однако вряд ли следует ожидать непрерывности этой линии (постоянства амплитуды $f = 13.5$), вследствие хаотизированного характера природы активности (пятна активности на Солнце), а также из-за того, что 27-суточная вариация солнечной активности не является единственным фактором изменения потока индекса $F10.7$. Эти дополнительные факторы могут “смешать” видимую на ВП-спектре частоту $f = 13.5$. В данном случае можно сказать лишь, что компонента $f = 13.5$ в спектре $F10.7$ присутствует практически постоянно и является основной наиболее ярко выраженной особенностью.

В вариациях циклогенеза выявляются две основные особенности: 1) наиболее интенсивные компоненты попадают в диапазон временных масштабов $S = 10\text{--}80$ сут; 2) отклик с максимальной амплитудой наблюдается на частотах, близких к $f = 13.5$. Поскольку интенсивность циклогенеза имеет ярко выраженный сезонный ход, ВД можно разделить на полушария. Во время минимума СА отклик на частоте $f = 13.5$ максимален в Северном полушарии, в то время как в Южном он отсутствует, при этом наблюдаются два максимума приблизительно на первой субгармонике (~ 54 сут) и на второй гармонике (~ 15 сут). В максимуме СА картина примерно такая же, но более богатая деталями.

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ ЦИКЛОГЕНЕЗА

ВП-спектры, вычисленные для каждого из 19 лет, были усреднены, результат показан на рис. 8 (на цветн. вклейках). Этот рисунок подтверждает полученные ранее выводы. В спектрах F10.7 наиболее яркой компонентой является 27-суточная ($S = 27$ сут) и, как и следовало ожидать, практически отсутствуют другие заметные компоненты. В ВП-спектрах интенсивности циклогенеза выявляются две области: область $S = 10\text{--}80$ сут и полугодовая структура, что отражает наличие ярко выраженного сезонного эффекта в тропическом циклогенезе. В области $S = 10\text{--}80$ сут наиболее яркой компонентой является $S = 27$ сут, практически всегда наблюдаемой в Северном полушарии. В Южном полушарии максимальный отклик чаще всего наблюдается на частотах, близких к гармоникам и субгармоникам основной частоты $f = 13.5$. Отклик на частоте $f = 13.5$ является, по видимому, вынужденным откликом на частоте внешнего солнечного воздействия.

Отклики интенсивности циклогенеза на гармониках и субгармониках $f = 13.5$ внешнего солнечной активности свидетельствуют о нелинейности системы тропического циклогенеза. Выявление того факта, что в большинстве случаев отклики не совсем точно совпадают с частотой $f = 13.5$ и с ее гармониками и субгармониками, позволяет предположить, что тропический циклогенез является проявлением сложного поведения термогидродинамической системы океан – атмосфера, обладающей собственными характерными частотами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты совместной специальной (вейвлет) обработки данных глобального циклогенеза и солнечной активности за период 1983–2001 гг.). Выявлено, что глобальный циклогенез имеет свои собственные временные

масштабы. Эти масштабы образуют в частотном пространстве область $S = 10\text{--}80$ сут, отделенную как от пуассоновской области (временные масштабы $S < 10$ сут), так и от годовых и полугодовых вариаций. Полугодовая структура отражает наличие ярко выраженного сезонного эффекта в тропическом циклогенезе. В пространственно-временных спектрах годовых рядов отклик глобального циклогенеза на внешнее (солнечное) воздействие с 27-суточным периодом наблюдается на частотах, близких к этой вынуждающей частоте, и ее второй гармонике и субгармоникам. В спектрах, усредненных за 19 лет в области $S = 10\text{--}80$ сут, наиболее яркой компонентой является $S = 27$ сут, практически всегда наблюдаемой в Северном полушарии. В Южном полушарии максимальный отклик чаще всего наблюдается на частотах, близких к гармоникам и субгармоникам основной частоты $f = 13.5$ год⁻¹. Результаты анализа вейвлет-спектров позволяют считать, что тропический циклогенез – проявление сложного нелинейного поведения единой термогидродинамической системы поверхность земли – атмосфера, обладающей собственными динамическими свойствами, характерными временными масштабами и (возможно) резонансными частотами.

Работа поддержана РФФИ, проект № 09-05-01019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Верс. 3.1. (1983–2005). М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
- Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 366 с.
- Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В.* Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 2. С. 18–25.
- Afonin V.V., Sharkov E.A.* Helioactivity and properties of global tropical cyclogenesis // Auroral Phenomenon and Solar-terrestrial Relations: Proc. Conf. in Memory of Yuri Galperin. 3–7 Febr. 2003, Moscow. P. 421–429.
- Cohen T.J., Sweetser E.I.* The “spectra” of the solar cycle and of data for Atlantic tropical cyclones // Nature. 1975. V. 256. № 5515. P. 295–296.
- Chui Ch.K.* An introduction to wavelets. N. Y.: Acad. Press, 1992. 266 p.
- Pielke R.A., Jr., Pielke R.A., Sr.* Hurricanes. Their nature and impacts on society. Chichester, N.Y., etc.: John Wiley and Sons, 1997. 279 p.

Elsner J.B., Kara A.B. Hurricanes of the North Atlantic. Climate and Society. N. Y., Oxford: Oxford University Press, 1999. P. 488.

Dickenson R.E. Solar variability and the lower atmosphere // *Bul. Amer. Meteorol. Soc.* 1975. V. 56. № 12. P. 1240–1248.

Meldrum C. On a Periodicity in the Frequency of Cyclones in the Indian Ocean South of the Equator // *Nature*. 1872. V. 6. P. 357–358.

Sharkov E.A. Remote sensing of tropical regions. Chichester, N. Y., etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.

Sharkov E.A. Global Tropical Cyclogenesis. Berlin, Heidelberg, L., N. Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.

Tsiropoula G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters // *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 2003. V. 65. № 4. P. 469–482.

Global Tropical Cyclogenesis and 27-days Variations of Solar Activity

E. A. Sharkov, V. V. Afonin

Institute Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow

Based on a developed and accumulated detailed data base, contained time series of tropical cyclogenesis during 19 years (1983–2001) and the analysis of archive data on the solar activity F10.7 it has been shown that tropical cyclogenesis response was observed to the internal effect of the 27-days solar variability by frequencies nearby forced oscillation and also on second harmonic and on sub-harmonics. In 19 years time – averaged spectra and in the interval of characteristic time scales for cyclogenesis $S = 10–80$ days the striking component is $S = 27$ days that always is observed in Northern hemisphere. In Southern hemisphere the maximum response is frequently observed by frequencies nearby harmonics and sub-harmonics of main frequency.

Keywords: global tropical cyclogenesis, solar activity, wavelet-analysis

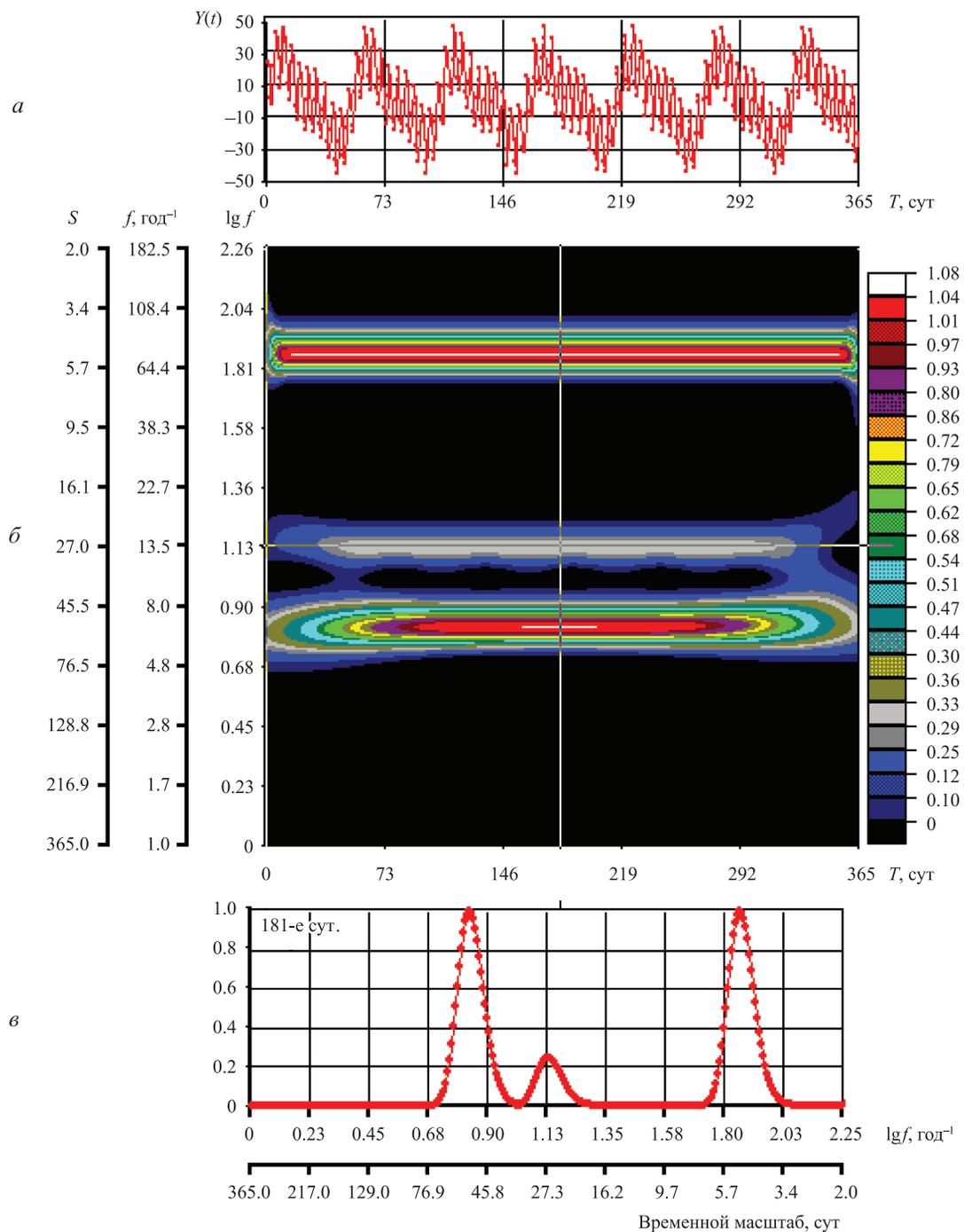


Рис. 1 а – Модельный временной ряд $Y(T)$ для периода времени в 365 дней (год); б – ВП-спектр мощности (нормированный на максимальное значение компонент спектра). Временная ось (ось абсцисс) соответствует дням года (T). Ось частот (ордината $\lg f$) логарифмическая, минимальная частота $\lg f = 0$ в начале координат (внизу), максимальная частота $\lg f = 2.26$ (вверху). Для удобства две другие шкалы слева отображают соответствующие частоты между $f_{\min} = 1$ (период $T = 1$ год) и $f_{\max} = 182.5$ (период $T = 2$ сут, частота Найквиста данного ряда) и соответствующие им временные масштабы S в днях; в – сечение ВП-спектра вдоль оси частот для фиксированного времени $T = 181$ сут.



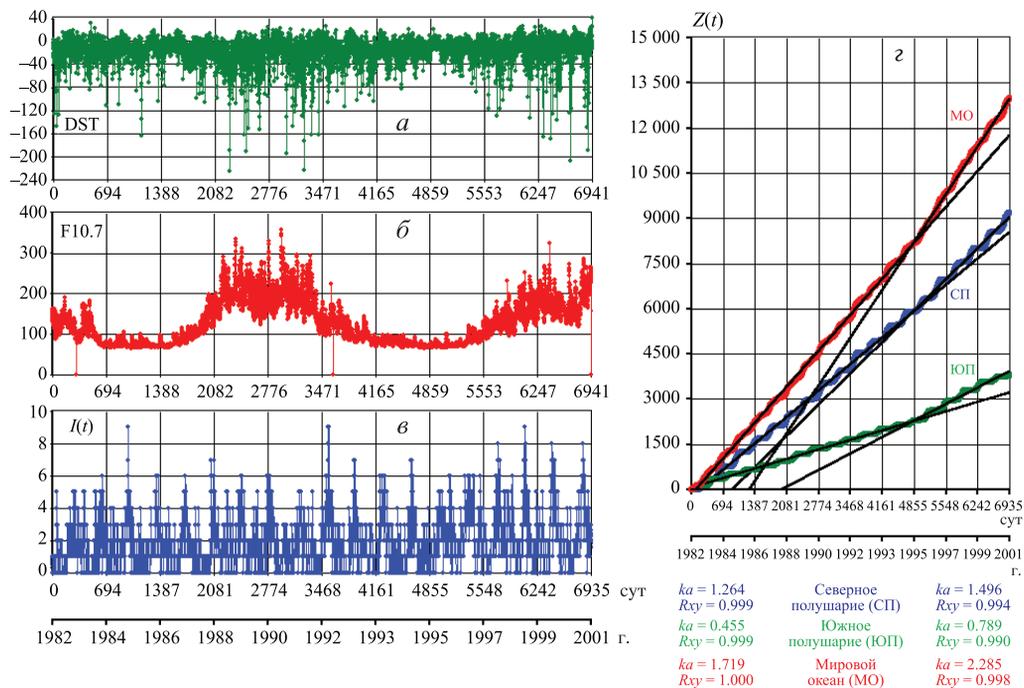


Рис. 2. Временной ход ежесуточных значений: *a* – индекса геомагнитной возмущенности DST (в гаммах); *b* – индекса активности Солнца F10.7 ($10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$); *c* – глобальной интенсивности циклогенеза $I(t)$, выраженной количеством циклонов за день $I(t)$ в течение 19 лет (1983–2001); *d* – функция накопления $Z(t)$ временного ряда интенсивности циклогенеза (нарастающая сумма ежедневного количества циклонов), внизу указаны наклоны ka аппроксимирующих кривых и коэффициенты корреляции R_{xy} до и после 1986 г.

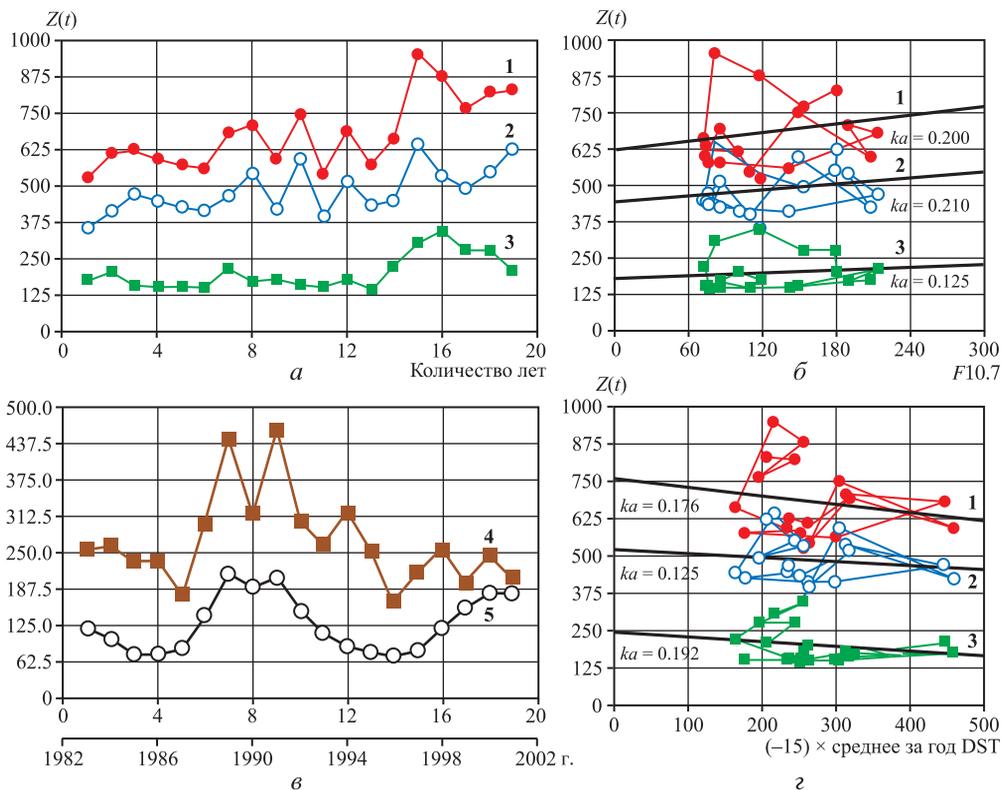


Рис. 3. Сравнение усредненных за год (*a*) значений интенсивностей циклогенеза для Мирового Океана (1), Северного (2) и Южного (3) полушарий с вычисленными аналогично значениями индекса солнечной F10.7 (4) и магнитной DST (5) активности (*e*); чтобы представить данные на том же графике, величины DST были умножены на -15 ; диаграммы рассеяния (*d*) каждого из трех параметров циклогенеза (глобальный, север, юг) от (*b*) F10.7 и (*e*) DST.

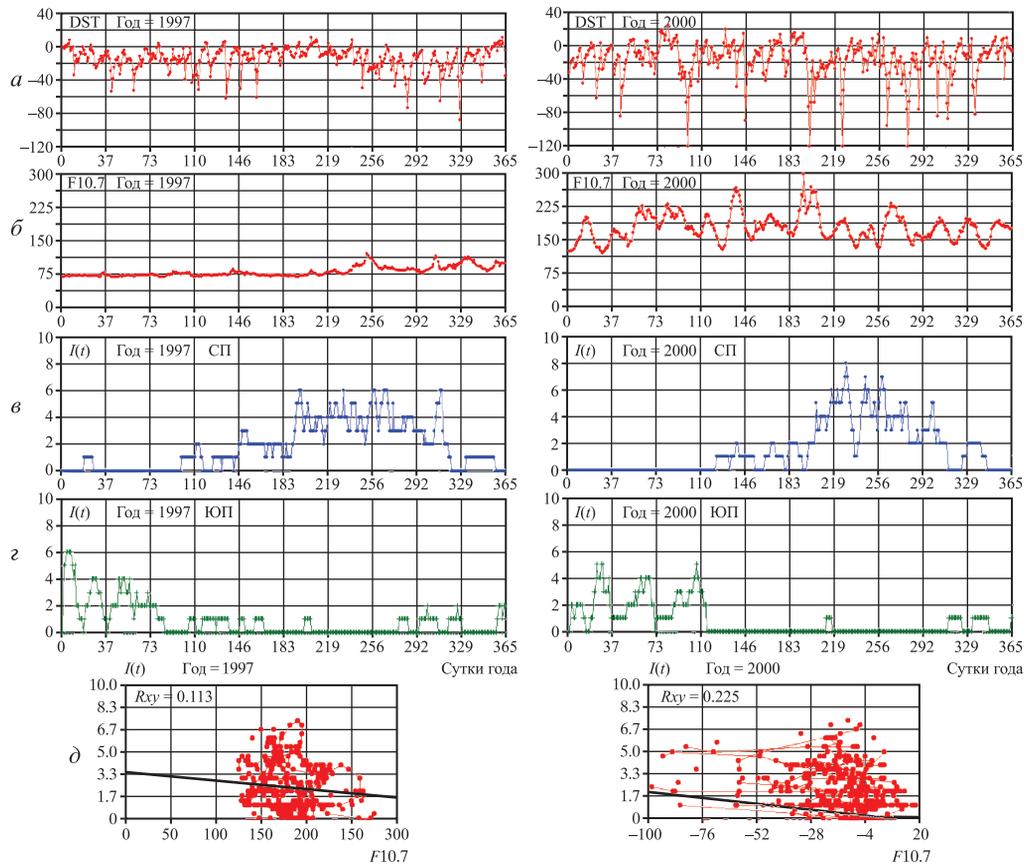


Рис. 4. Временные ряды годовых вариаций: *а* – DST, *б* – F10.7 и *в* – интенсивности циклогенеза в Северном и *г* – в Южном полушариях для минимума (слева, 1997 г.) и максимума (справа, 2000 г.) солнечной активности; *д* – диаграммы рассеяния зависимости глобального количества $I(t)$ от F10.7 (слева) и DST (справа) для каждого дня года.

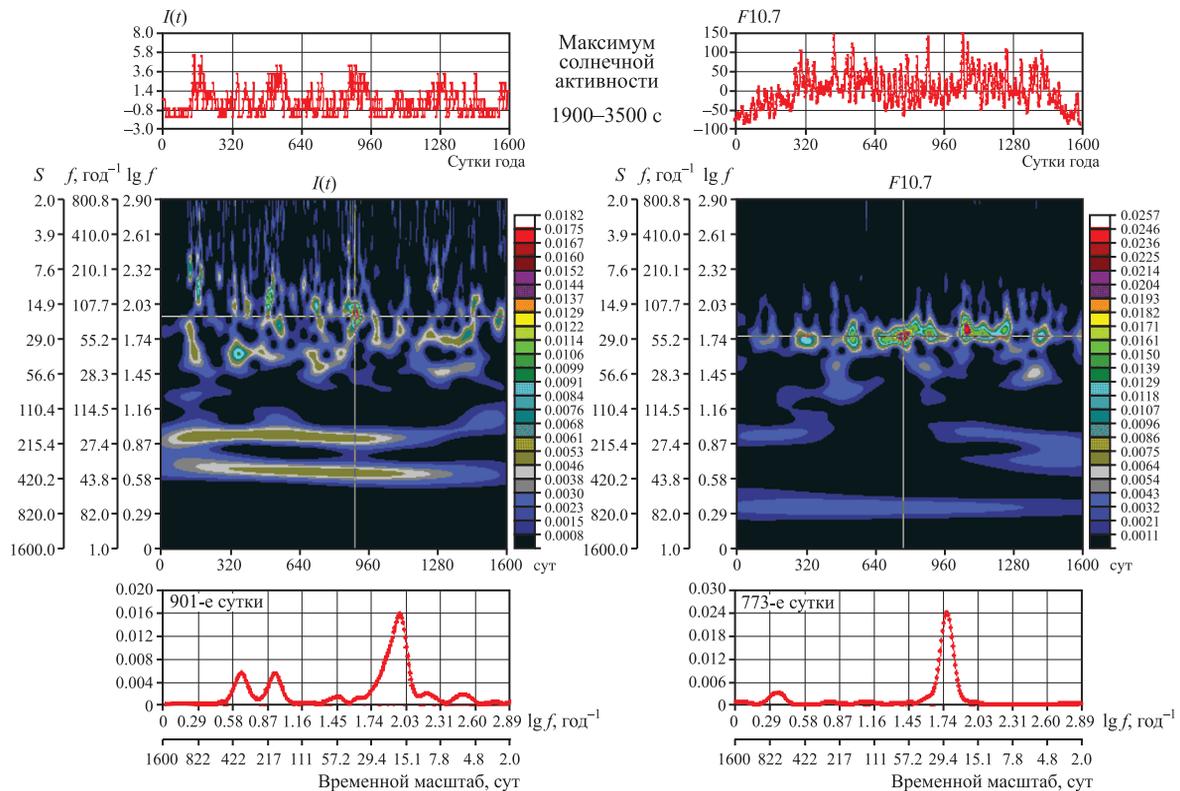


Рис. 6. Результаты ВП (ВП-спектры) глобального ряда интенсивности циклогенеза (слева) и параметра F10.7 (справа) длины 1600 дней в максимуме солнечной активности (СА). Вверху – соответствующие временные ряды (с вычтенным средним за год). Внизу – сечения вдоль оси частот для указанного дня.



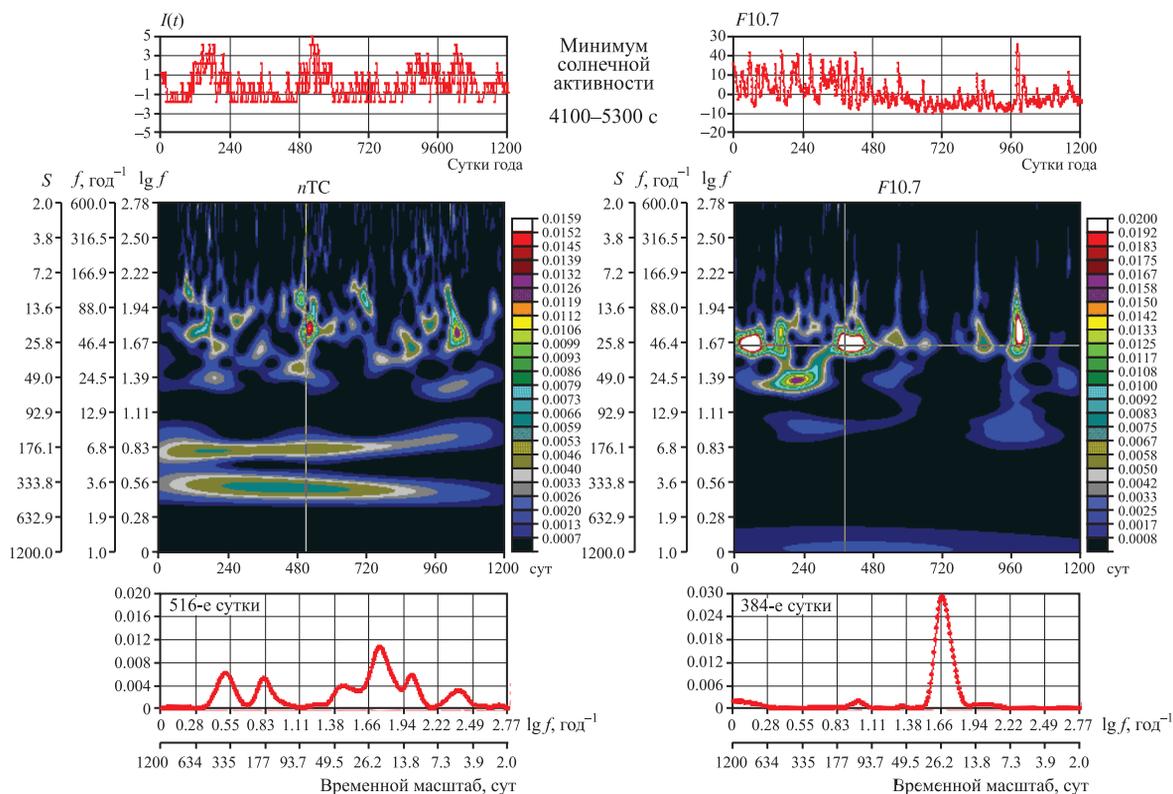


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для рядов длиной 1200 дней в минимуме СА.

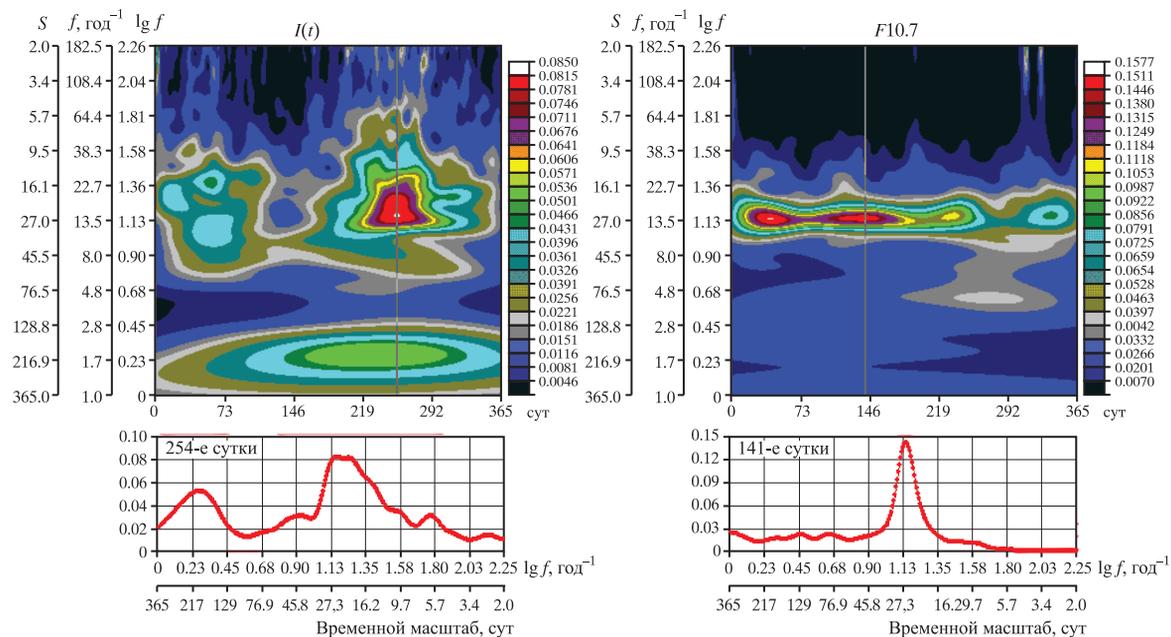


Рис. 8. ВП-спектры глобального циклогенеза $T(t)$ (слева) и индекса солнечной активности $F10.7$ (справа), полученные усреднением вычисленных для каждого из 19 лет спектров.

