

УДК 551.5:551.521

СОБСТВЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

© 2011 г. А. А. Гусев

Учреждение РАН Институт космических исследований, Москва

e-mail: ganso@pochta.ru

Поступила в редакцию 11.09.2009 г.

После доработки 21.01.2010 г.

Многие климатические параметры (температуры земли и поверхности океана, давление, осадки и др.) испытывают временные вариации с характерными периодами от нескольких до нескольких десятков и более лет. Неизвестная причина этих осцилляций вместе со сходством некоторых из них с известными солнечными циклами стимулирует постоянные попытки связать эти два явления. Основные аргументы, против существования такой связи заключаются в том, что вариации климатических параметров не всегда происходят синхронно с соответствующими 11- и 22-летними солнечными циклами: фазовый сдвиг между климатическими и солнечными вариациями непостоянен и изменяется со временем от 0° до 180° . Кроме того, мощность земных проявлений солнечной активности представляется недостаточной для стимулирования рассматриваемых погодно-климатических процессов, по крайней мере, в рамках линейного подхода. В настоящей работе показано, что в некоторых случаях эти противоречия могут быть устранены для вариаций с периодом более 11 лет в предположении, что климатические вариации являются вынужденными осцилляциями под воздействием внешней силы (например, связанной с солнечной активностью), что, естественно, предполагает наличие собственных климатических осцилляций. Полученный результат служит дополнительным аргументом в пользу реальности связи солнце–климат и, возможно, указывает на ее вероятный нелинейный механизм.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на понимание фундаментальных физических процессов, управляющих климатом Земли, точные механизмы его естественной долговременной изменчивости остаются неясными. В большой мере это относится к вариациям с характерными периодами от нескольких до нескольких десятков лет (см.: например, обзоры [King, 1975; Burroughs, 2003]). В настоящее время это явление привлекает к себе возрастающее внимание, в связи с возможным антропогенным воздействием на глобальный климат. Хотя предположение о возможном влиянии солнечной активности на климат Земли появилось еще в XVII веке, однако, до настоящего времени так и не предложен достаточно обоснованный теоретически или экспериментально физический механизм, который мог бы объяснить такую связь.

Основная трудность при анализе десятилетних и более продолжительных климатических изменений — это, конечно, недостаток длительных (>100 лет) и непрерывных (по времени и пространству) рядов прямых метеорологических наблюдений. Большинство пригодных для анализа данных непосредственных измерений начинаются в первой четверти прошлого столетия, что явно недостаточно для получения статистически обоснованных результатов.

В последнее десятилетие исследование климатических вариаций сосредоточено на изменениях в температуре поверхности океана. Статистический анализ таблиц, подготовленных в NOAA на основе наблюдательных данных (распределения по времени и поверхности Земли), и палеоданных по соотношению содержания элементов Sr/Ca в скелетах кораллов [Dima et al., 2005]) и по годовым кольцам деревьев, [Evans et al., 2001] для Атлантики и Тихого океана убедительно свидетельствует о существовании вариаций с десятилетними и большими периодами в температуре поверхности океана. Некоторые из существующих моделей глобальной циркуляции, хотя и воспроизводят десятилетние и более долговременные вариации, однако, причины их вызывающие, оказываются разными [Grötzner et al., 1998; Liang et al., 1995; Wainer et al., 2002; Garric and Huber, 2003].

Оставляя в стороне “внешнее” воздействие, происхождение собственных климатических колебаний может быть объяснено в рамках стохастической модели климата [Hasselmann, 1976] через свойственную атмосфере способность генерировать низкочастотные осцилляции вследствие внутренних нелинейных процессов обратной связи [James and James, 1989]). Что же касается воздействия солнечной и, связанной с нею магнитосферной активности и/или вариации интенсивности кос-

мических лучей, то в последнее время наиболее обсуждаемыми являются гипотеза изменения солнечной постоянной (вариации с периодом порядка нескольких десятилетий [Lohmann et al., 2004]) и гипотеза модуляции плотности облачного покрова/аэрозолей через ионизацию, производимую космическими лучами (вариации с периодом близким к 11 годам [Svensmark and Friis-Christensen, 1997]). В моделях, рассматривающих более традиционные механизмы, наблюдаемые изменения стратосферных параметров, вызванные изменениями в интенсивности потоков солнечного ультрафиолета и магнитосферными высыпаниями, передаются в тропосферу через взаимодействие планетарных волн с зональными циркуляциями [Langematz et al., 2005]. Возможность возбуждения климатических осцилляций в результате представляющегося наиболее естественным нелинейного отклика климатической системы на вариации солнечной активности рассмотрена в работах [Распопов и др., 1998; 2001; Tobias and Weiss, 2000].

Общеизвестные трудности гипотезы внешнего воздействия состоят в том, что вариации климатических параметров не всегда происходят синхронно с соответствующими 11- и 22-летними солнечными циклами, а фазовый сдвиг между климатическими и солнечными вариациями непостоянен и может изменяться в пределах от 0° до 180° [King, 1975; Пудовкин и Морозова, 1999; 2000; 2000a; Gusev et al., 2004]. Кроме того, мощность земных проявлений солнечной активности представляется недостаточной для стимулирования реальных погодно-климатических процессов, по крайней мере, в рамках линейного подхода.

В настоящей работе доступные данные по долговременным климатическим вариациям проанализированы на предмет наличия характерных особенностей, позволяющих связать их с возможным влиянием солнечной активности, и предложена математическая модель возможной нелинейной связи.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

В качестве образца для анализа климатических вариаций использованы данные прямых измерений уровня осадков (т.е. выраженное в миллиметрах количество осадков за год) из <http://dss.ucar.edu/datasets/ds570.0/>. Эти данные являются единственными общедоступными данными, содержащими ряды прямых наблюдений, достигающих полуторавековой продолжительности и охватывающих большую часть земной поверхности. Данные прямых наблюдений предпочтены табличным данным из <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded> из-за возможных искажений, связанных с процедурами интерполяции и сглаживания, применяемых при создании глобальных таблиц. Известно что, ин-

тенсивность и происхождение осадков могут резко отличаться даже в масштабах нескольких километров в зависимости от рельефа поверхности, ее покрова и других особенностей местности.

Были проанализированы несколько десятков начинающихся в XIX веке рядов данных с уровнем осадков (УО) по всему миру. Составляющие вариации с периодами <7 (межгодовые), 7–16 (десятилетние), 16–70 (междесятилетние) и >70 (вековые) выделялись с использованием фильтра быстрого Фурье-преобразования и процедур сглаживания. Данные на рисунках представлены в относительных единицах, т.е. в относительных отклонениях величины от среднего значения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Относительные амплитуды межгодовых, десятилетних, и междесятилетних компонент приблизительно равны для всех рассмотренных случаев. Характерный результат для расположенной на атлантическом побережье Форталезы (Бразилия), приведен на рис. 1. Амплитуды же вековых колебаний изменяются от нуля (Форталеза) до $\approx 30\%$ (Чарльстон) полной вариации, достигая минимальных значений в основном в тропических областях. Межгодовые и десятилетние составляющие не демонстрируют (по крайней мере, явных) особенностей, отличающих их от соответствующих компонент шумового спектра. В то же время междесятилетние компоненты демонстрируют определенную регулярность, частично повторяющую описанную в работах [King, 1975; Gusev et al., 2004], а именно, между 1860 и 1950 годами изменение УО находится в фазе с соответствующей компонентой вариации числа Вольфа солнечных пятен (ЧСП), с последующим увеличением периода и опрокидыванием фазы относительно вариации ЧСП. Приведенные на рис. 2 междесятилетние вариации УО для Форталезы и Чарльстона наглядно демонстрируют подобное поведение.

При анализе табличных данных (<http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded>) подобный временной профиль был также обнаружен в нескольких климатических параметрах в прилегающем к Форталезе районе океана. Показанная на рис. 3 кривая разницы температур воздуха и поверхности океана (SMINA) аналогична показанной на рис. 2, но с изменяющейся задержкой, достигающей 10 лет. Сходство характера вариации нескольких независимых параметров свидетельствует в пользу того, что наблюдаемый в УО профиль, скорее всего, не является случайной флуктуацией.

В отличие от примерного равенства амплитуд десятилетней и междесятилетней вариаций УО (рис. 1), амплитуда десятилетней компоненты ва-

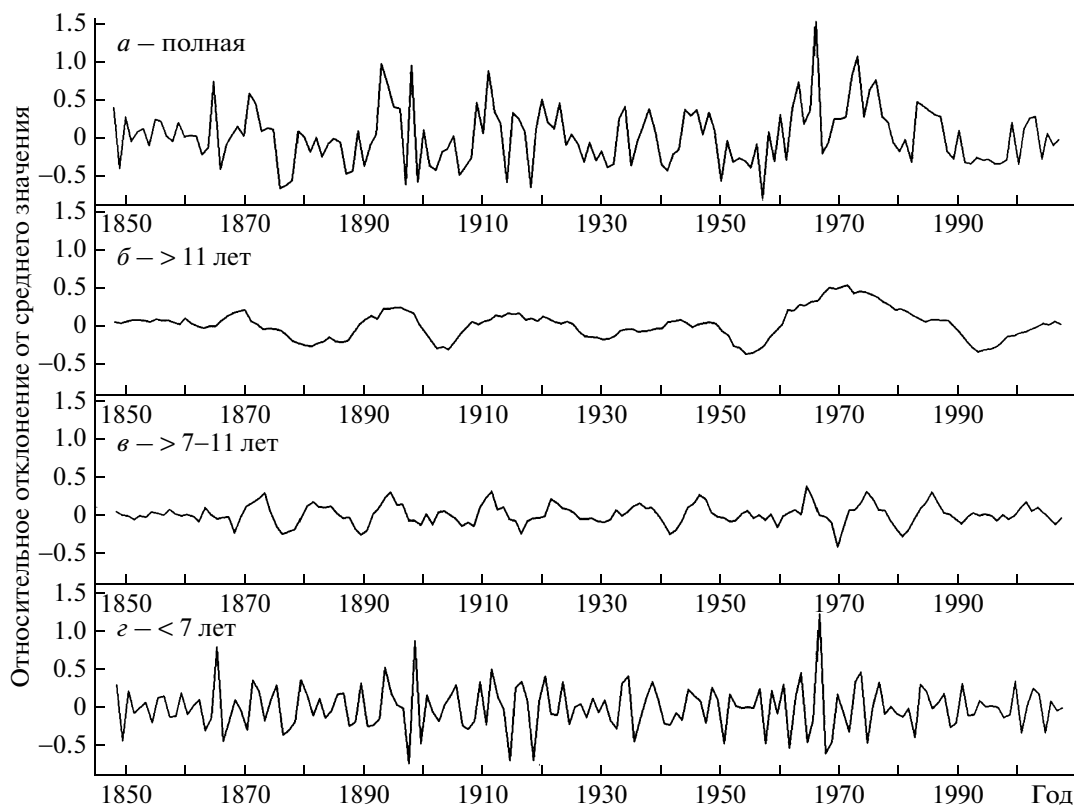


Рис. 1. Полная (а) вариация среднегодового уровня осадков в Форталезе (Бразилия) и, полученные с помощью бегущего среднего, междесятилетия (б) и десятилетия (в) компоненты. Остаточная межгодовая вариация (г) есть разность между полной вариацией а и компонентами б и в. Вековая компонента в вариации отсутствует.

риации солнечной активности (показана на рис. 4) в 5–10 раз превышает ее же междесятилетнюю компоненту. Это указывает на возможное резонансное взаимодействие между солнечной активностью и климатической системой. В данном случае это означает, что период в 20–40 лет ближе к собственному периоду климатической системы, чем десятилетний. В качестве примера подходящего периода можно указать цикл Брюкнера с приблизительно 30–40-летней продолжительностью [Brückner, 1915].

Опрокидывающуюся фазу и изменяющуюся задержку обычно рассматривают, как эффекты, противоречащие предположению о причинной связи между климатическими и солнечными вариациями. Кроме того, наблюдаемые в ЧСП долговременные вариации с периодами, превышающими 30 лет, не связаны ни с каким известным космофизическим явлением (аналогичным, например, 22-летнему циклу переполусовки солнечного магнитного диполя), воздействием которого можно было бы объяснить соответствующую климатическую вариацию. Следует, однако, иметь в виду, что наблюдаемые и в ЧСП, и в космических лучах вариации с периодами, превышающими 11 лет, являются всего-навсего результатом раз-

личия в амплитудах последовательных 11-летних циклов, регистрируемых в этих же параметрах. Это видно из рис. 4, где циклы 10–11, 12–13, и 14–15 образуют три последовательных двойных (≈ 22 года) солнечных цикла (циклы Хейла), а циклы 16–20 и 20–23 – два последовательных ≈ 40 -летних цикла (точно таких же, как и в УО). Вариация интенсивности космических лучей (КЛ) в большой степени повторяет, но с некоторой задержкой и в противофазе, кривую ЧСП и содержит все те же компоненты, что и вариация ЧСП [Mursula et al., 2001; Poryavin, 2004; Ogurtsov et al., 2002]. Поэтому одно только присутствие 22-х летней компоненты в вариации климатического параметра не позволяет однозначно связать его с каким-либо одним из двух гипотетических механизмов связи Солнце–климат, то есть с взаимодействием солнечного ветра и энергичных солнечных частиц с магнитосферой и стратосферой или с прямой ионизацией, производимой космическими лучами в тропосфере. Однако, если рассматривать отдельные циклы, то имеющиеся различия между вариациями КЛ и ЧСП [Peristykh et al., 1998], в принципе, могут позволить выбрать между последними, как одной из причин вариаций, если подобная альтернатива имеет место (см., например, [Palle et al., 2004]).

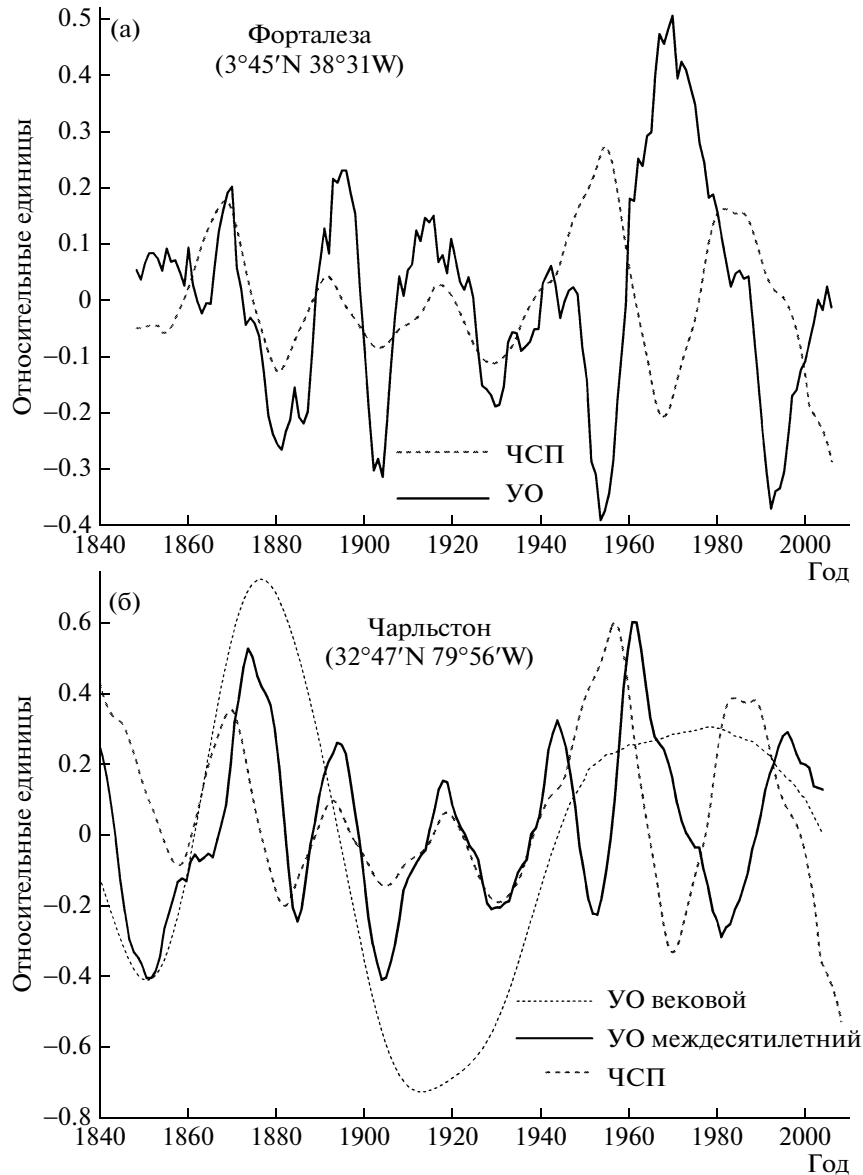


Рис. 2. Кривые междесятилетних вариаций уровня осадков в Форталезе (Бразилия) и Чарльстоне, США, полученные в результате применения 11-летнего бегущего среднего к среднегодовым значениям. Соответствующая кривая для ЧСП получена с помощью двух последовательных применений той же процедуры.

Вариации УО с периодом ≥ 20 лет в Форталезе (кривая “УО” на рис. 2а) для первых трех периодов (циклы 10–15) находятся строго в фазе с соответствующей вариацией ЧСП и в противофазе для двух последующих более длительных (≈ 40 лет) периодов. Опрокидывание фазы при изменении частоты является хорошо известной особенностью вынужденных колебаний с малым затуханием при изменении частоты ω_f внешней силы вблизи собственной частоты ω_0 системы: если частота внешней силы ниже собственной частоты $\omega_f < \omega_0$, то осцилляция происходит в фазе с внешней силой, при $\omega_f > \omega_0$ – в противофазе. При наличии затухания осцилляция происходит со сдвигом фазы

отличным от 180° . Эффект проиллюстрирован на рис. 5а, где сплошная кривая описывает решение уравнения вынужденных колебаний

$$y''(t) + \omega_0^2 y(t) - \Gamma y'(t) = F(t), \quad (1)$$

с собственной частотой $\omega_0 = \sqrt{2}$, постоянной затухания $\Gamma = 0.2$, и гармонической внешней силой $F(t)$ с периодом равным $\pi = 2\pi/\omega_1$ для $t < 0$ и $2\pi = 2\pi/\omega_2$ для $t \geq 0$, т.е. $\omega_2 < \omega_0 < \omega_1$. Очевидно весьма близкое сходство полученного результата с кривыми для УО на рис. 1б и 2, если предположить, что вынуждающей силой долговременных (≈ 20 –

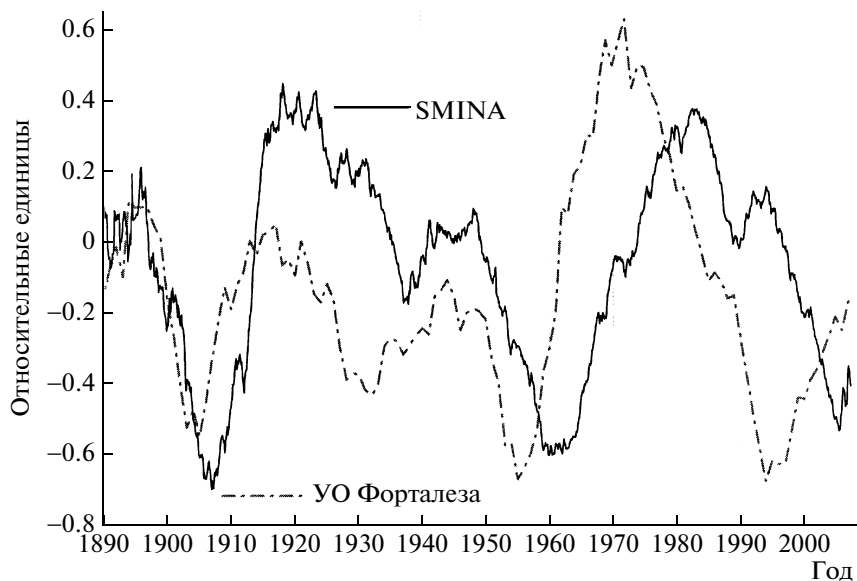


Рис. 3. Междесятилетняя вариация разницы температур воздуха и поверхности океана (SMINA) в сравнении с соответствующей вариацией уровня осадков в Форталезе.

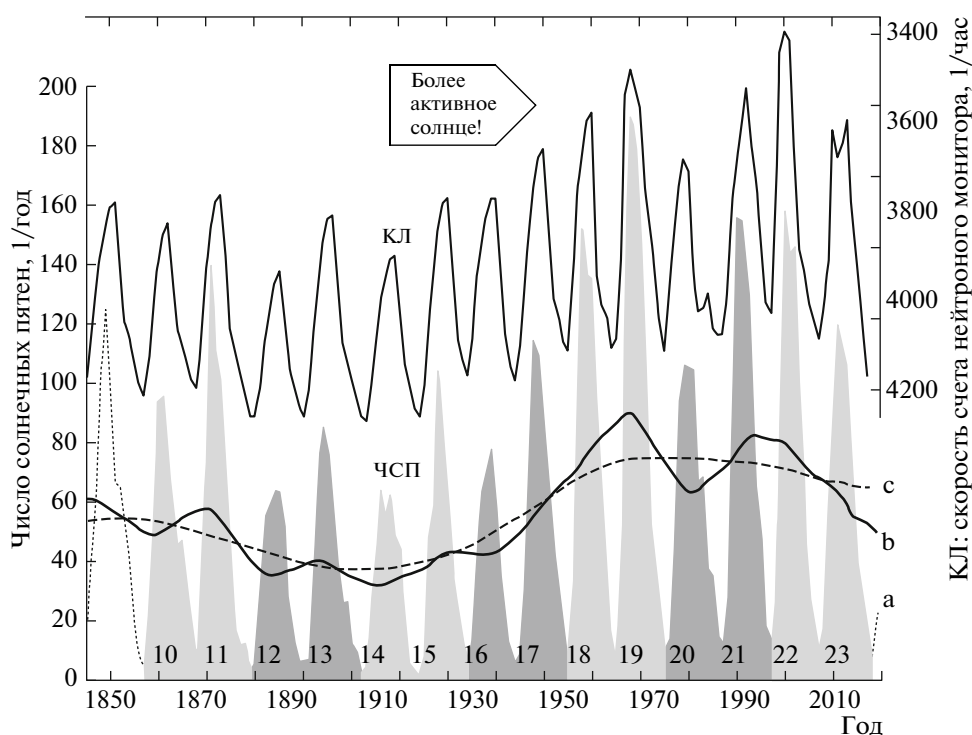


Рис. 4. Различия амплитуд 11-летних циклов ЧСП и КЛ, приводящие к междесятилетним вариациям их интенсивности. Сплошная кривая (б) для междесятилетних циклов, получена с помощью двух последовательных применений 11-летнего бегущего среднего к кривой (а) среднегодового числа солнечных пятен. Кривая вековой модуляции (с) получена с помощью 20-ти последовательных применений. Числа над нижней шкалой абсцисс указывают номер 11-летнего цикла. Для кривой вариации космических лучей (КЛ) до 1953 г. использована реконструкция [Usoskin и др., 2005], для последующих лет — данные нейтронного монитора в Клаймаксе.

40 лет) вариаций УО является соответствующая вариация ЧСП.

Результат решения уравнения вынужденных колебаний с внешней силой, описываемой кри-

вой междесятилетних вариаций ЧСП(t), показан на рис. 5б. Наилучшее согласие решения с соответствующей кривой для Форталезы получено для уравнения

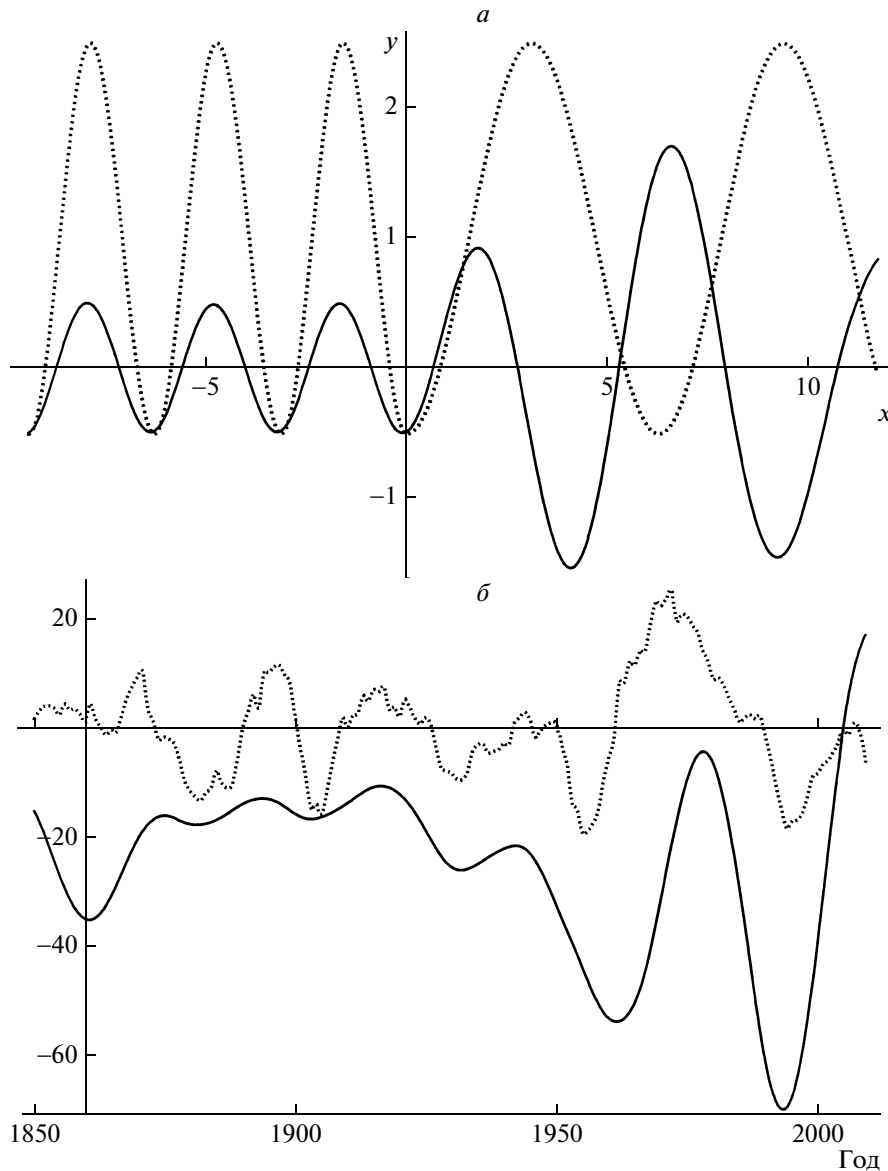


Рис. 5. Решение уравнения (1) вынужденных колебаний (сплошная кривая). *a* – собственная частота $\omega_0 = \sqrt{2}$, вынуждающая сила (пунктирная кривая) с частотой $\omega_f = 2$ для $t < 0$ и 1 для $t > 0$; *б* – собственная частота $\omega_0 = 34.4$ года, вынуждающая сила описывается междесятилетней вариацией ЧСП; пунктирная кривая – междесятилетняя вариация УО в Форталезе.

$$y''(t) + \omega_0^2 y(t)(1 - \mu y(t)) = F(t), \quad (2)$$

со слегка нелинейной возвращающей силой в форме $\omega_0^2 y(t)(1 - \mu y(t))$ ($\mu = 0.0035$), собственной частотой $\omega_0 = 2\pi/T_0$ ($T_0 = 34.4$ года) и вынуждающей силой $F(t) = 0.02$ (ЧСП)($t - n$), где значение $n = 10$ близко к минимальному значению вариации ≈ 14 ЧСП.

Несмотря на простоту уравнения, полученное решение удовлетворительно воспроизводит главные особенности междесятилетней вариации УО, включая опрокидывание фазы, увеличение периода и изменение амплитуды. Из-за отсутствия за-

тухания ширина резонансного пика оказывается очень узкой (~ 0.1 года). Естественно, что период реальной климатической осцилляции вряд ли может поддерживаться с такой высокой точностью и хорошее согласие кривых в пределах всей области решения, без какого-либо зависящего от времени свободного параметра, может быть отчасти случайным.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученное соотношение является чисто математическим, не позволяя сравнивать энергии осцилляции и внешнего воздействия. Однако в

рассматриваемом случае отсутствия затухания ($\Gamma = 0.0$), это и не имеет особого физического смысла, так как в среднем за период такой осциллятор не поглощает энергию от источника внешнего воздействия. Таким образом, предложенная гипотеза, возможно, отвечает на главный аргумент против возможности связи между солнечной активностью и климатом – слишком низкая энергия солнечной вариации по сравнению с коррелируемыми климатическими.

Из-за постоянного присутствия солнечного воздействия не ясно, может ли гипотетическая собственная частота климатических колебаний наблюдаться непосредственно. Однако подтверждение ее существования могло бы быть найдено в результатах моделей глобальной циркуляции, не учитывающих солнечную вариацию. Действительно подобные периоды воспроизводятся некоторыми моделями. Например, Wainer and Venegas, [2002] обнаружили вариацию с периодом 25–30 лет в давлении над поверхностью океана при 300-летнем интегрировании модели NCAR. Yiñ et al., [2003], интегрируя модель GFDL для интервала, превышающего 10000 лет, обнаружили частоту с периодом 35.4 лет в температуре и солености поверхностного слоя океана, толщине морского льда и ряде других параметров.

Как показали Shinbrot et al., [1997], динамическим поведением хаотических систем, к которым, несомненно, относится и климат, можно управлять посредством очень малых возмущений. Это означает, что механизм, объясняющий результат настоящей работы, мог бы быть построен в рамках стохастической модели климата.

Осадки являются результатом взаимодействия сразу нескольких климатических факторов, и естественно предположить, что амплитуда различных составляющих (межгодовой, десятилетней, междесятилетней и вековой) определяется различным происхождением осадков. Однако данные по УО, разделенные в соответствии с их происхождением, отсутствуют, что объясняется необходимостью огромной работы, которую потребовал бы подобный анализ.

На северном побережье бразильских штатов Рио-Гранде до Норте и Сеара (где находится Форталеза) имеются, по крайней мере, четыре источника осадков: холодные фронты, бризы с моря и суши и их взаимодействие с масштабными метеорологическими системами [Kousky, 1979; 1980]. Соотношение между ними в каждом пункте зависит, среди прочего, от характера рельефа и его покрытия (песок, тип растительности и т.д.) и может изменяться на расстоянии километров. В Форталезе ситуация, возможно, более простая из-за незначительного влияния приходящих с юга холодных фронтов [Kousky, 1979] и высокой корреляции УО с поверхностной температурой Атлантического океа-

на [Markham et al., 1977; Uvo et al., 1998], что, по-видимому, означает, что УО в Форталезе в основном определяются климатическими параметрами Атлантического бассейна.

5. ВЫВОДЫ

Характерный временной профиль обнаружен в вариации уровня осадков в некоторых пунктах Атлантического побережья американского континента.

Особенности профиля могут быть воспроизведены с помощью уравнения вынужденных колебаний, в предположении, что вынуждающей силой является составляющая вариации ЧСН с периодом, варьирующимся в пределах от 16 до 70 лет. Это также предполагает наличие климатической осцилляции с собственным периодом более 30 лет. Возможным кандидатом на эту роль является хорошо известный цикл Брюкнера (период 34 и более лет), наблюдающийся в вариациях некоторых климатических параметров.

Полученный результат указывает на принципиальную возможность существования нелинейного механизма связи солнечных и климатических вариаций, который практически не зависит от энергии, поступающей от управляющего агента, и допускает определенную разницу фаз между коррелируемыми солнечными и климатическими параметрами. Кроме того результат является косвенным подтверждением возможности существования собственных долговременных вариаций климатической системы.

Результаты непосредственных измерений уровня осадков взяты из базы данных ds570.0 (<http://dss.ucar.edu>) Архива исследовательских данных (RDA) Лаборатории вычислительных и информационных систем (CISL) Национального центра атмосферных исследований (NCAR), спонсируемого Национальным научным фондом (NSF) США. Данные по уровням осадков в Форталезе обновлены по информации сайта Национального метеорологического института Бразилии (<http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php>). Табличные климатические данные получены в подразделении физических наук Национального управления по океану и атмосфере США (NOAA-ESRL) (Боулдер, Колорадо) через сайт <http://www.cdc.noaa.gov/>. Использованы данные нейтронного монитора в Клаймаксе, поддерживаемого “National Science Foundation Grant ATM-0339527”.

Реконструированные данные интенсивности КЛ получены из GBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series #2008-013, NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пудовкин М.И., Морозова А.Л. 11-летние вариации климата в Швейцарии с 1700 по 1989 гг. и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 3. С. 3–8. 2000.
- Пудовкин М.И., Морозова А.Л. Климат центральной Европы вариации солнечной XVI–XX вв. и вековые активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 6. С. 68–75. 2000а.
- Пудовкин М.И., Морозова А.Л. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в вариациях индексов температуры и увлажненности в Швейцарии с 1700 по 1989 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 2. С. 34–39. 1999.
- Распопов О.М., Ловелиус Н.В., Шумилов О.И., Касаткина Е.А. Экспериментальные подтверждения нелинейного характера воздействия солнечной активности на земную атмосферу и окружающую среду // Биофизика. Т. 43. № 5. С. 863–867. 1998.
- Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Турунен Е., Линдхолм М., Колстрем Т. Нелинейный характер воздействия солнечной активности на климатические процессы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 3. С. 420–425. 2001.
- Bruckner E. The settlement of the United States as controlled by climate and climatic oscillations // Memorial Vol. Transcontinental Excursion of 1912 of the American Geographical Society of New York, American Geographical Society. New York. С. 125–139. 1915.
- Burroughs W.B. Weather Cycles: Real or Imaginary? Second Edition, Cambridge University Press, 2003.
- Dima M., Felis T., Lohmann G., Rimbu N. Distinct modes of bidecadal and multidecadal variability in a climate reconstruction of the last centuries from a South Pacific coral // Climate Dynamics. Т. 25. DOI:10.1007/s00382-005-0043-2. 2005.
- Evans M.N., Kaplan A., Cane M.A., Villalba R. Globality and optimality in climate field reconstructions from proxy data. Inter-hemispheric Climate Linkages. Под ред. Markgraf V., С. 53–72. Cambridge University Press. Cambridge. UK. 2001.
- Garric G., Huber M. Quasi-decadal variability in paleoclimate records: Sunspot cycles or intrinsic oscillations? // Paleoclimatology. Т. 18. № 3. doi:10.1029/2002PA000869. С. 13-1 – 13-6. 2004.
- Gusev A.A., Mello S.M.G., Martin I.M., Pankov V.M., Pugacheva G.I., Schuch N.I., Spjeldvik W.N. // Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil // Adv. Space Res. Т. 34. № 2. С. 370–375. 2004.
- Grötzner A., Latif M., Barnett T.P. A Decadal Climate Cycle in the North Atlantic Ocean as simulated by the ECHO Coupled GCM // J. Climate. Т. 11. № 5. С. 831–847. 1998.
- Hasselmann K. Stochastic climate models, Part 1: Theory // Tellus. Т. 28. С. 473–485. 1976.
- James N., James P.M. Ultralow-frequency variability in a simple circulation model // Nature. Т. 342. С. 53–55. 1989.
- King J.W. Sun-weather relationships // Astronautics and Aeronautics. Т. 13. С. 10–19. 1975.
- Kousky V.E. Frontal Influences on Northeast Brazil, Monthly Weather Review. Т. 107. С. 1140–1153. 1979.
- Kousky V.E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil // Monthly Weather Review. Т. 108. С. 488–498. 1980.
- Langematz U., Matthes K., Grenfell J.L. Solar impact on climate: modeling the coupling between the middle and the lower atmosphere // Memorie della Societade astronomica Italiana. Т. 76. С. 868–875. 2005.
- Liang X.-Z., Samel A.N., Wang W.-C. Observed and GCM simulated decadal variability of monsoon rainfall in east China // Climate Dynamics. Т. 11. № 2. С. 103–114. 1995.
- Lohmann R., Rimbu N., Dima M. Climate signature of solar irradiance variations: analysis of long-term instrumental, historical, and proxy data // Intern. J. Climatology // Т. 24. С. 1045–1056. DOI: 10.1002/joc.1054. 2004.
- Markham C.G., Mclain D.R. Sea surface temperatures related to rain in Ceara, Northeastern Brazil // Nature. Т. 265. С. 320–323. 1977.
- Mursula K., Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Persistent 22-year cycle in sunspot activity: Evidence for a relic solar magnetic field // Solar Physics. Т. 198. С. 51–56. 2001.
- Ponyavin D.I. Solar cycle signal in geomagnetic and climate // Solar Physics. Т. 224. № 1–2. С. 465–471. 2004.
- Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Nagovitsyn Yu.A., Jungner H. Long-period cycles of the Sun’s activity recorded in direct solar data and proxies // Solar Physics. Т. 211. С. 371–394. 2002.
- Peristykh A.N., Damon R.E. Modulation of atmospheric 14 C concentration by the solar wind and irradiance components of the Hale and Schwabe solar cycles // Solar Physics. Т. 177. № 1–2. С. 343–355. 1998.
- Palle P., Butler C.J., O’Brien K. The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. Т. 66. С. 1779–1790. 2004.
- Svensmark H., Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. Т. 59. С. 1225–1232. 1997.
- Shinbrot T.C., Grebogi J.A., Yorke, Ott E. Using small perturbations to control chaos // Nature. Т. 363. С. 411–417. 1993.
- Tobias S.M., Weis N.O. Resonant interactions between solar activity and climate // J. Climate. Т. 13. С. 3745–3759. 2000.
- Uvo C.B., Repelli C.A., Zebiak S.E., Kushnir Y. The Relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation // J. Climate. Т. 11. С. 551–562. 1998.
- Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., Mursula K. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951–2004 // J. Geophys. Res. Т. 110. С. A12108.1–A12108. 2005.
- Wainer I., Venegas S.A. South Atlantic multidecadal variability in the climate system model // J. Climate. Т. 15. С. 1408–1420. 2002.
- Yih H., Motoi T., Chan W.-L. Natural Southern-Hemispheric Mode of Interdecadal Oscillation in a Climate Model // Abst. EGS-AGU-EUG Joint Assem. France, Nice, 6–11 April 2003. Abstract #1125. 2003.