Прикладные задачи нелинейной теории колебаний и волн

УДК 551.465

ХАОС И ПОРЯДОК В АТМОСФЕРНОЙ ДИНАМИКЕ

Часть 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания

И. В. Серых[1], *Д. М. Сонечкин*[1,2]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский проспект д. 36
[2]Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13
E-mail: iserykh@ocean.ru, dsonech@ocean.ru

Поступила в редакцию 19.05.2017

Основываясь на математической теории о так называемом странном нехаотическом аттракторе в квазипериодически форсированных динамических системах, по данным о температуре поверхности океана и атмосферном давлении на уровне моря за 1870–2014 годы исследованы процессы Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК). Обнаружено, что на ЭНЮК влияет не только годовой ход притока тепла от Солнца к климатической системе, но еще три другие внешние силы, периоды которых несоизмеримы с годовым периодом. Эти силы связаны с лунно-солнечной нутацией оси вращения Земли (приблизительный период 18.6 года), 11-летним циклом солнечной активности и чандлеровским колебанием полюсов Земли (период около 1.2 года). Из-за взаимной несоизмеримости периодов этих сил, все они воздействуют на климатическую систему в «неподходящие» моменты времени. В результате временные индексы, представляющие процессы ЭНЮК, выглядят очень сложными («странными» в математических терминах), но не хаотичными. Показано, что энергетические спектры индексов ЭНЮК имеют полосы повышенной спектральной плотности, расположенные на суб- и супергармониках вышеперечисленных периодов. На основе специальных рассмотрений структуры энергетических спектров индексов ЭНЮК получено свидетельство их дискретности, то есть нехаотичности. Этого ранее никто не предполагал. Несмотря на сложность процессов ЭНЮК, динамика временных индексов этих процессов обнаруживает определенную внутреннюю согласованность, похожую на ту, что присуща странным нехаотическим аттракторам. Эта согласованность проявляется в существовании пиков в энергетических спектрах и соответствующих этим пикам ритмов в динамике индексов ЭНЮК. Принятие модели странного нехаотического аттрактора для ЭНЮК означает, что нет никаких пределов предсказуемости ЭНЮК в принципе. На практике это открывает возможность прогнозировать ЭНЮК на несколько лет вперед.

Ключевые слова: Энергетические спектры Эль-Ниньо – Южного Колебания, квазипериодичность внешних воздействий на климатическую систему, чандлеровское колебание, лунно-солнечная нутация, солнечная активность, странный нехаотический аттрактор.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-5-25

Образец цитирования: Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 5–25. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-5-25

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

CHAOS AND ORDER IN ATHMOSPHERIC DYNAMICS

Part 2. Interannual rhythms of the El Niño – Southern oscillation

I. V. Serykh[1], *D. M. Sonechkin*[1,2]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nahimovskiy prospekt, 117997 Moscow, Russia
[2]Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation
11–13, Bol'shoi Predtechenskii per., 123242 Moscow, Russia
E-mail: iserykh@ocean.ru, dsonech@ocean.ru

Received 19.05.2017

Processes of the El Niño – Southern Oscillation (ENSO) are investigated based on the mathematical theory of the so-called the strange nonchaotic attractor (SNA) in the quasi-periodically forced dynamic systems, and using the sea surface temperature and the atmospheric sea-level pressure data for the 1870–2014 year period. It is found that ENSO is influenced not only by the annual Sun-induced periodic heating of the climate system, but also by the three more other external forces which periods are incommensurable to the annual period. These forces are induced by the 18.6-year Luni-Solar nutation of the Earth's rotation axis, the 11-year cycle of the solar activity and the Chandler wobble in the Earth's pole motion (the period 1.2 years). Because of the reciprocal incommensurability of the periods of these forces, all of them affect the climatic system in «improper» time moments. As a result, the dynamics of the indices representing the ENSO processes look to be very complex (strange in mathematical terms), but not chaotic. It is shown that power spectra of the ENSO indices have some bands of the increased spectral density located on sub- and superharmonics of above-mentioned periods. On the basis of some special considerations of structure of the power spectra of the ENSO indices the evidence of the discreteness of these spectra, i.e. the spectra being nonchaoticity, is received. Nobody assumed this circumstance earlier. Despite complexity of the ENSO processes, the dynamics of the temporal variations of these process indices reveals an internal ordering similar to that internal order which is known to be inherent to the SNA dynamics. This ordering reveals itself in the existence of spectral density peaks in the ENSO power spectra, and some rhythms corresponding to these peaks in the temporal variations of the ENSO indices. Acceptance of the SNA model for ENSO means that there are no predictability limits for ENSO in principle. In practice, it opens an opportunity to predict ENSO for several years ahead.

Keywords: Power spectra of the El Niño – Southern Oscillation, quasi-periodicity of the external climate system drivers, the Chandler wobble, the Luni-Solar nutation, the Solar activity, strange nonchaotic attractor.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-5-25

References: Serykh I.V., Sonechkin D.M. Chaos and order in athmospheric dynamics. Part 2. Interannual rhythms of the El Niño – Southern oscillation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Issue 5. P. 5–25. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-5-5-25

Введение

Оценки энергетических спектров колебаний климата в широком диапазоне временных масштабов – от года до тысяч и даже сотен тысяч лет – публиковались неоднократно. Как, вероятно, самую первую из них, можно упомянуть оценку Дж.Е. Курцбаха и Р.А. Брайсона [1, 2], которую отечественный читатель легко найдет в книге А.С. Монина и Ю.А. Шишкова [3]. Конечно, сейчас эта оценка выглядит очень наивной. Тем не менее, для целей настоящей работы она важна, ибо в ней климатический спектр показан непрерывным, что принималось практически во всех

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

последующих оценках, публиковавшихся вплоть до недавнего времени. Относительно низкочастотная часть (периоды более тысячи лет) в спектре Курцбаха – Брайсона была определена как «красный шум», а относительно высокочастотная (периоды от года до ста лет) – как «белый шум», то есть все локальные увеличения и уменьшения спектральной плотности (за исключением только дельта-пика на годовом периоде) трактовались как несущественные.

За годы после публикации Курцбаха и Брайсона было накоплено много новых инструментальных метеорологических наблюдений и появились многочисленные палеоклиматические реконструкции. Это позволило существенно уточнить форму и количественные характеристики климатического энергетического спектра (см., например, [4]). Одна из недавних, считающаяся сейчас наиболее точной, оценка климатического энергетического спектра приведена в [5]. При ее интерпретации также была подчеркнута непрерывность спектра, и все колебания климата были определены как хаотические. В относительно высокочастотной части (периоды от года примерно до ста лет) средний наклон спектра (в двойных логарифмических координатах) был оценен авторами работы [5] как равный 0.37 и 0.58, а в относительно низкочастотной части (периоды более ста лет) – как равный 1.64 и 1.29, исходя из данных по континентам в высоких широтах и океанам в низких широтах, соответственно. Это подтверждает вывод Курцбаха и Брайсона о «белом» и «красном» характере высоко- и низкочастотных климатических «шумов». Вместе с тем, в [5] признается наличие в спектре статистически значимых пиков спектральной плотности, связанных с откликами глобальной климатической системы на изменения и перераспределения по поверхности Земли приходящей солнечной радиации. О возможном наличии откликов на другие периодически меняющиеся внешние силы не упоминается.

В данной работе предметом рассмотрения является только часть климатического спектра, соответствующая междугодовым изменениям в процессах Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК). Заметим, что методически сходное рассмотрение для части климатического спектра, соответствующей геологическому масштабу времени в десятки и сотни тысяч лет, было сделано в работах [6–11] с основным выводом об отсутствии хаотичности.

Важная роль сезонности в динамике ЭНЮК и, соответственно, в формировании спектров ЭНЮК распознана давно. Однако количественное рассмотрение этой роли было сделано сравнительно недавно двумя группами западных специалистов по физике атмосферы и океана. Одну группу неформально возглавлял М. Гил, а другую – Э. Циперман. В 1994 году эти группы опубликовали свои работы в одном и том же номере журнала Science [12]. Одновременность публикаций свидетельствует о том, что редакция Science поняла крайнюю важность той постановки задачи о природе ЭНЮК, которая была дана в этих статьях. Фактически впервые в них были использованы выводы математиков о бифуркациях инвариантного тора как аттрактора периодически форсированной нелинейной динамической системы. В последующие годы были опубликованы еще несколько статей, развивающих эту идею [13–17]. В них известная из наблюдений ритмичность ЭНЮК объяснялась как сезонный «захват фазы» – феномен, доказанный математиками как типичное свойство периодически форсированных систем с тор-аттракторами.

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

Любопытно, что ссылок на все эти публикации в последующих работах по проблеме ЭНЮК очень мало. Это говорит о том, что международное сообщество метеорологов еще не оценило должным образом идею, высказанную Гилом и Циперманом с коллегами. В отечественной метеорологической литературе бифуркации инвариантных торов использовались для объяснения механизмов возбуждения двухлетних и еще более долгопериодных колебаний в атмосферных моделях гораздо раньше (см. книгу [18] и статьи [19, 20]), но особой реакции широкого круга отечественных исследователей на эти работы тоже не было.

Важно подчеркнуть, что смоделированная вышеупомянутыми группами американских ученых ритмичность ЭНЮК воспроизводила реальную ритмичность ЭНЮК только качественно. Пики в энергетическом спектре ЭНЮК получились на кратных году периодах типа 2:1 (двухлетний цикл), 3:1 (трехлетний цикл), 5:2 (два цикла за пять лет) и т. п. Главный же пик в реальных спектрах ЭНЮК обычно оценивается как равный 3.6 года (см., например, [21]). Причина этого в том, что на ЭНЮК явно влияет не только годовой ход притока тепла от солнца, но и другие периодические внешние силы, периоды которых отличны от годового периода и, вероятно, несоизмеримы с ним. По-видимому, впервые это было предположено в [22]. Конкретно в качестве еще одной внешней силы, существенной для ЭНЮК, было указано чандлеровское колебание полюсов Земли с периодом около 1.2 года. Много внимания чандлеровскому колебанию как движителю ЭНЮК уделял также Н.С. Сидоренков (см. [23] и его последующие публикации).

Учет многих периодических внешних сил, вероятно, важен не только для описания и предсказания ЭНЮК, но также для многих других долгопериодных процессов в атмосфере, поскольку в такой нелинейной системе, как климатическая, все процессы, в принципе, взаимодействуют друг с другом. Пропагандистами этой идеи еще с 1990-х годов выступают американские исследователи Р.Дж. Карри и С. Хамид [24, 25].

1. Исходные данные и методика их обработки

Для вычисления энергетических спектров ЭНЮК и установления по ним периодичностей, влияющих на ЭНЮК, в настоящем исследовании использованы английские глобальные базы ежемесячных данных о температуре поверхности океана (ТПО) с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (HadISST) и атмосферном давлении на уровне моря (ДУМ) с разрешением $5^\circ \times 5^\circ$ (HadSLP2). Эти базы находятся в открытом доступе за весь период инструментальных наблюдений: 1870–2014 для температуры и 1850–2014 для давления [26, 27]. Для вычисления энергетических спектров различных индексов ЭНЮК был выбран, как основной, период 1870–2014. Этот период представляется оптимальным, поскольку, с одной стороны, он имеет длительность, уже достаточную для выявления ритмов ЭНЮК в диапазоне от года до десяти лет, и, с другой стороны, относящиеся к этому периоду данные наблюдений полнее и надежнее, чем за период более ранних инструментальных метеорологических наблюдений. Для проверки результатов были использованы данные ТПО COBE2 (1850–2014) и ERSSTV4 (1854–2015), данные ДУМ NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis v2c (1851–2011) [28] и ERA-20C (1900–2010). Рассчитанные по этим дан-

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

ным спектры имеют пики на тех же периодах, что и рассчитанные по английским данным, что подтверждает полученные результаты.

Индексы ЭНЮК рассчитывались, как средние аномалии ТПО в регионах Nino1+2, Nino3, Nino3.4 и Nino4, затем по ним были подсчитаны спектры (табл. 1). Исходя из полноты данных, имеющихся в базе HadISST, регионы Nino2, Nino3 и Nino3.4 были скомбинированы в виде суммы, то есть рассматривались аномалии ТПО в среднем для региона (5° с.ш.– 5° ю.ш., 170°– 80° з.д.). По этим аномалиям был вычислен временной ряд индекса, названного Расширенным океаническим индексом Эль-Ниньо (РОИ) – Extended Oceanic Nino Index (EONI). В отличие от часто используемого индекса ONI, базирующегося на довольно скудной базе судовых наблюдений в центре экваториальной зоны Тихого океана (район Nino3.4), при расчете РОИ учитывались многочисленные наблюдения судов, выходящих из Панамского канала в сторону Азии и Австралии.

Для исследования атмосферной компоненты процессов ЭНЮК был выбран Экваториальный Индекс Южного Колебания (ЭИЮК) – Equatorial Southern Oscillation Index (ESOI). Он рассчитывается как разность средних аномалий ДУМ между регионом Индонезии (5° с.ш.– 5° ю.ш., 90°–140° в.д.) и восточной частью экваториального Тихого океана (5° с.ш.– 5° ю.ш., 130°– 80° з.д.). На наш взгляд этот индекс репрезентативнее стандартного SOI (разность ДУМ между г. Дарвин и о. Таити), поскольку охватывает большие территории, находящиеся на экваторе.

Энергетические спектры указанных индексов рассчитывались двумя методами: быстрым преобразованием Фурье (БПФ) самих рядов и преобразованием Фурье предварительно рассчитанной временной корреляционной функции (ПФК). Метод БПФ обладает более высоким разрешением по частоте, а метод ПФК позволяет надежнее оценить амплитуды пиков. Для увеличения надежности спектральных оценок, спектры вычислялись многократно путем последовательного укорачивания рассматриваемых рядов вплоть до их сокращения до 1/3 от первоначальной длины. Причем окна, по которым определялись укороченные ряды, пробегали исходные ряды от их начала и до их конца. Затем все полученные спектры усреднялись и, в некоторых случаях, производилось их сглаживание. После вычисления всех спектров определенного типа рассчитывалось их среднее.

Спектры рассчитывались как по полному ряду среднемесячных значений РОИ и ЭИЮК, так и отдельно для каждого месяца года: только январей, только февралей и т. д. Расчет спектров по полным рядам (месяц за месяцем и год за годом) общепринят в климатологии. Расчет же по рядам отдельных месяцев соответствует принятому в математической теории периодически форсированных динамических систем рассмотрению динамики исследуемой системы на периоде одной из внешних сил (дискретному «отображению»). Такое отображение исключает из явного рассмотрения более высокочастотную, по сравнению с периодом выбранной внешней силы, динамику. Сезонность динамики при этом исследовалась путем сравнения отображений, присущих разным месяцам года. Этот метод позволил исследовать энергетические спектры ЭНЮК отдельно для фазы наиболее сильного развития событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья (месяцы с октября по февраль).

Была исследована чувствительность полученных результатов к изменению длины ряда данных. Для этого спектры индексов считались отдельно для периодов: 1850–2014, 1870–2014, 1900–2014 и 1920–2014 (Табл. 2 и 3).

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

Таблица 1. Периоды (в годах) спектральных пиков индексов Nino1+2, Nino3, Nino3.4 и Nino4 для баз данных HadISST, ERSSTV4 и COBE2, упорядоченные по убыванию мощности

Table 1. Periods (in years) of the spectral peaks of the indices Nino1+2, Nino3, Nino3.4 and Nino4 for the HadISST, ERSSTV4 and COBE2 databases arranged in descending order of the spectral density

	HadISST 1870–2014 Nino				ERSSTV4 1870–2015 Nino				COBE2 1870–2014 Nino			
№	1+2	3	3.4	4	1+2	3	3.4	4	1+2	3	3.4	4
1	3.62	5.70	5.69	5.66	3.56	5.70	5.68	5.65	3.60	5.70	5.69	9.03
2	3.60	3.54	3.53	12.95	13.55	3.54	2.88	12.92	3.59	3.54	3.54	5.67
3	3.61	3.63	2.88	3.54	3.60	3.63	13.16	20.88	3.56	3.60	8.98	12.98
4	3.56	3.60	3.79	20.63	6.60	3.60	3.54	6.42	5.72	3.62	13.10	3.63
5	5.71	5.17	3.64	5.08	5.72	5.19	5.16	2.88	5.20	3.78	3.62	3.55
6	3.79	3.79	5.13	3.64	52.67	2.88	3.79	3.64	3.79	5.17	3.60	3.56
7	6.56	2.88	3.60	2.88	5.19	3.79	3.64	3.55	6.56	2.87	2.87	3.57
8	5.19	4.28	13.09	4.77	2.88	13.36	6.39	3.56	6.53	4.28	3.79	3.58
9	6.52	4.27	4.79	3.79	4.33	6.41	3.60	3.57	2.88	4.27	5.13	28.94
10	2.88	4.80	4.26	3.60	3.40	2.32	4.24	3.58	4.33	13.37	4.78	2.88

Таблица 2. Периоды (в годах) спектральных пиков индекса РОИ (EONI) для баз данных HadISST, ERSSTV4 и COBE2, упорядоченные по убыванию мощности

Table 2. Periods (in years) of the spectral peaks of the EONI for the HadISST, ERSSTV4 and COBE2 databases arranged in descending order of the spectral density

	HadISST EONI			ERSSTV4 EONI				COBE2 EONI			
№	1870–2014	1900–2014	1920–2014	1854–2015	1870–2015	1900–2015	1920–2015	1850–2014	1870–2014	1900–2014	1920–2014
1	5.70	3.58	3.57	5.71	5.70	3.59	3.59	5.72	5.70	3.58	3.58
2	3.54	5.64	5.09	2.87	3.54	5.66	5.13	3.79	3.54	5.64	5.09
3	3.63	5.15	5.65	3.79	3.63	5.18	5.70	3.53	3.60	5.15	5.66
4	5.16	6.51	4.84	3.54	3.60	6.48	4.74	2.87	3.62	6.51	4.78
5	3.79	4.84	4.79	5.20	2.88	4.21	6.41	3.63	3.62	4.21	4.84
6	2.88	4.21	2.87	3.64	5.18	13.04	2.87	3.64	3.78	4.84	4.76
7	4.28	4.23	4.19	13.02	3.79	2.88	4.16	8.92	2.87	4.86	2.87
8	4.27	4.88	2.45	6.35	13.29	4.78	2.45	3.60	5.16	4.88	4.15
9	4.80	2.87	6.44	3.59	6.40	4.80	12.93	5.20	8.93	4.91	2.12
10	13.22	3.78	2.12	3.39	2.32	3.78	2.12	3.39	13.29	3.77	6.44

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

Таблица 3. Периоды (в годах) спектральных пиков индекса ЭИЮК (ESOI)
для баз данных HadSLP2, NOAA-CIRES 20CRv2c и ERA-20C,
упорядоченные по убыванию мощности

Table 3. Periods (in years) of spectral peaks of the ESOI for the HadSLP2,
NOAA-CIRES 20CRv2c and ERA-20C databases in descending order of the spectral density

	HadSLP2 ESOI				NOAA-CIRES 20CRv2c ESOI				ERA-20C ESOI	
№	1850–2014	1870–2014	1900–2014	1920–2014	1851–2011	1870–2011	1900–2011	1920–2011	1900–2010	1920–2010
1	5.70	5.68	5.65	5.09	5.73	5.72	5.66	3.59	3.58	3.58
2	61.00	59.38	53.50	66.00	5.71	3.54	3.58	5.07	5.66	5.09
3	2.88	3.54	3.59	3.60	3.53	2.88	5.10	5.67	5.16	5.67
4	3.53	2.88	5.18	5.68	2.88	3.63	5.03	2.44	6.53	4.83
5	5.19	5.18	6.49	4.84	3.64	3.79	2.57	53.42	13.16	13.04
6	3.80	3.79	4.86	4.80	3.79	51.50	6.52	2.57	4.20	6.40
7	3.39	3.63	4.85	2.45	3.40	13.02	2.45	6.40	4.20	2.57
8	3.64	3.60	2.87	6.38	9.01	8.95	4.20	2.86	4.89	2.45
9	4.81	6.47	3.77	2.87	8.99	41.04	4.20	2.17	3.79	2.86
10	3.60	6.46	2.45	31.50	2.78	2.32	12.85	2.15	9.12	2.12

2. Результаты

На рис. 1 показаны энергетические спектры РОИ (вверху) и ЭИЮК (внизу), полученные методом быстрого преобразования Фурье по полному ряду среднемесячных значений этих индексов за 1870–2014 гг. Предварительно из данных был удален годовой ход. Показаны также 95-процентные и 5-процентные доверительные интервалы для соответствующих спектров «красного шума». В междугодовом диапазоне у самих спектров видны многочисленные пики, точнее более или менее узкие полосы повышенной спектральной плотности. Одна из причин уширения оснований этих пиков вполне очевидна. Она состоит в конечной и сравнительно небольшой длине рассматриваемого ряда. Другая, далеко не очевидная, причина состоит в том, что на самом деле каждый видимый на рис. 1 широкий пик может слагаться из многих близко расположенных дельта-пиков.

Положение на оси временных периодов и соотношения амплитуд всех полос повышенной спектральной плотности вполне соответствуют статистически значимым пикам во многих ранее публиковавшихся спектрах индексов ЭНЮК в диапазоне двух-десяти лет [29]. Наиболее мощными на обоих спектрах являются статистически-значимые полосы повышенной спектральной плотности, приходящиеся на периоды около 5.1, 3.8, 3.6 и 2.9 года. На спектре РОИ также присутствуют полосы значимостью 95% на периодах около 2.4, 2.1, 1.8, 1.5 и 1.2 года, а на спектре ЭИЮК – на периоде около 5.6 года.

Чтобы быть уверенными в периодах пиков, которые подразумеваются под этими полосами, можно использовать указание теории квазипериодически форсирован-

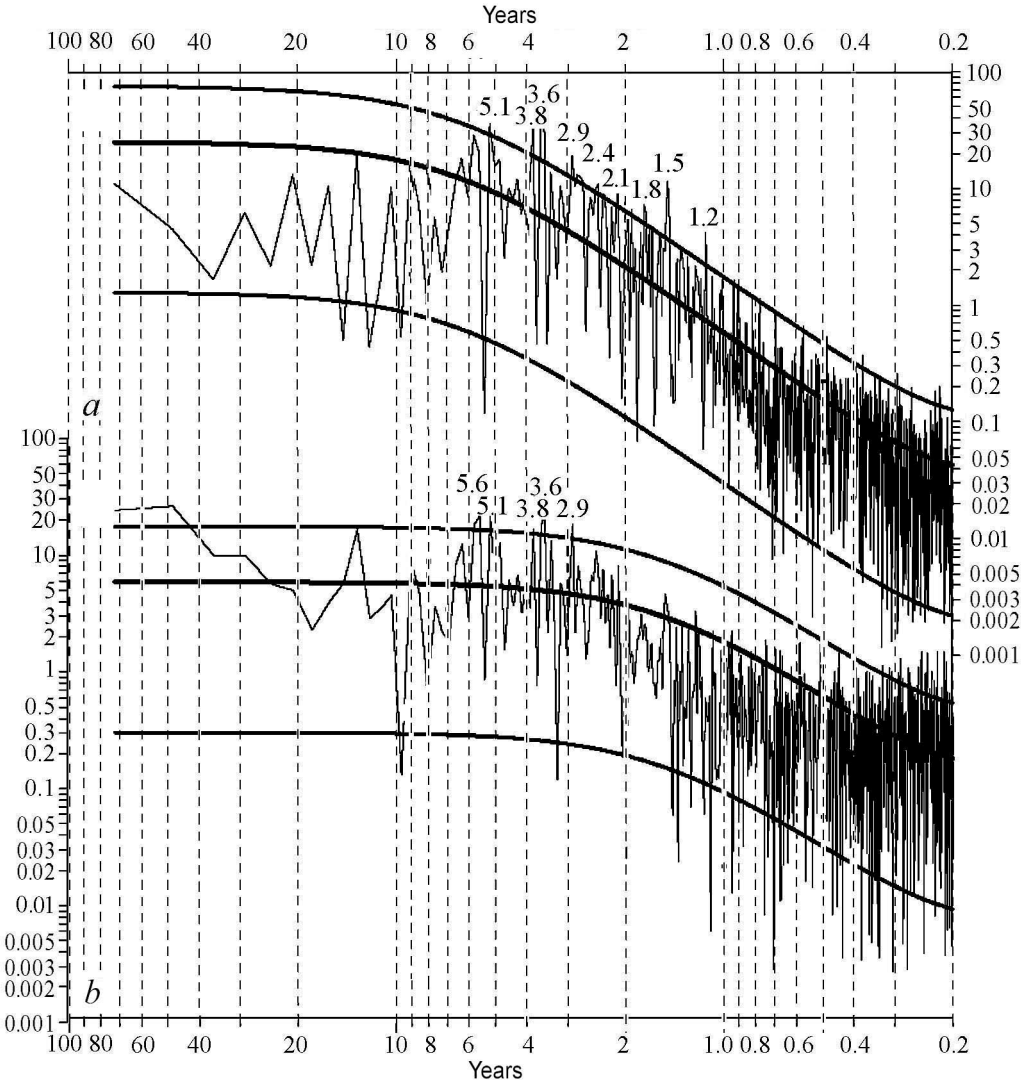


Рис. 1. Энергетические спектры рядов среднемесячных значений индексов РОИ (*a*) и ЭИЮК (*b*) за 1870–2014 после удаления сезонного хода. Отмечен доверительный интервал от 5% (гладкая линия внизу) до 95% (гладкая линия вверху) и спектр красного шума (гладкая линия между ними)

Fig. 1. Power spectra of the time series of the monthly mean values (detrended) of the EONI (*a*) and ESOI (*b*) estimated over the 1870–2014 year period. The significance limits of 5% (a smooth line below) and of 95% (a smooth line upper) as well as the respective red-noise spectrum (a smooth line in between) also are shown

ных динамических систем с так называемыми странными нехаотическими аттракторами (СНА) о самоподобии энергетических спектров СНА. Самоподобие означает, что соотношения периодов и амплитуд пиков в спектрах СНА одинаковы для разных частей СНА-спектров после соответствующего их перемасштабирования.

Так, обычно отношение мощности годовой полосы к полугодовой и отношение полугодовой полосы к четвертьгодовой примерно одинаковы. То же самое имеет место для отношений мощностей полосы 3.6 года к полосе 2.9 года, и полосы 2.9 года к полосе 2.4 года. Соответственно, период полосы 3.6 года относится к периоду полосы 2.9 года как примерно 1.2. Таково же отношение периода полосы 2.9 года к периоду полосы 2.4 года. Можно идти дальше и сравнивать мощности полос и их

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

периоды для супергармоник с таковыми у субгармоник. Все эти отношения близки по величине. Поэтому самоподобие спектров РОИ и ЭИЮК допустимо считать существующим. Это подтверждает реальность рассматриваемых полос повышенной спектральной плотности, независимо от формальной 95-процентной статистической оценки их значимости.

Обратимся теперь к рис. 2, на котором представлены энергетические спектры рядов среднемесячных значений РОИ и ЭИЮК в диапазоне периодов от года до десяти лет, подсчитанные путем многократного пересчета, как это описано в разделе 2. Эти спектры являются существенно более детальными, чем на рис. 1, что позволяет обсудить природу видимых в них полос повышенной спектральной плотности. Еще раз отметим, что формально-статистическая значимость пиков в спектрах индексов Эль-Ниньо уже обсуждалась во многих ранее опубликованных работах. Например, в спектре индекса Nino3, показанном в статье [21], имеется девять пиков, уровень

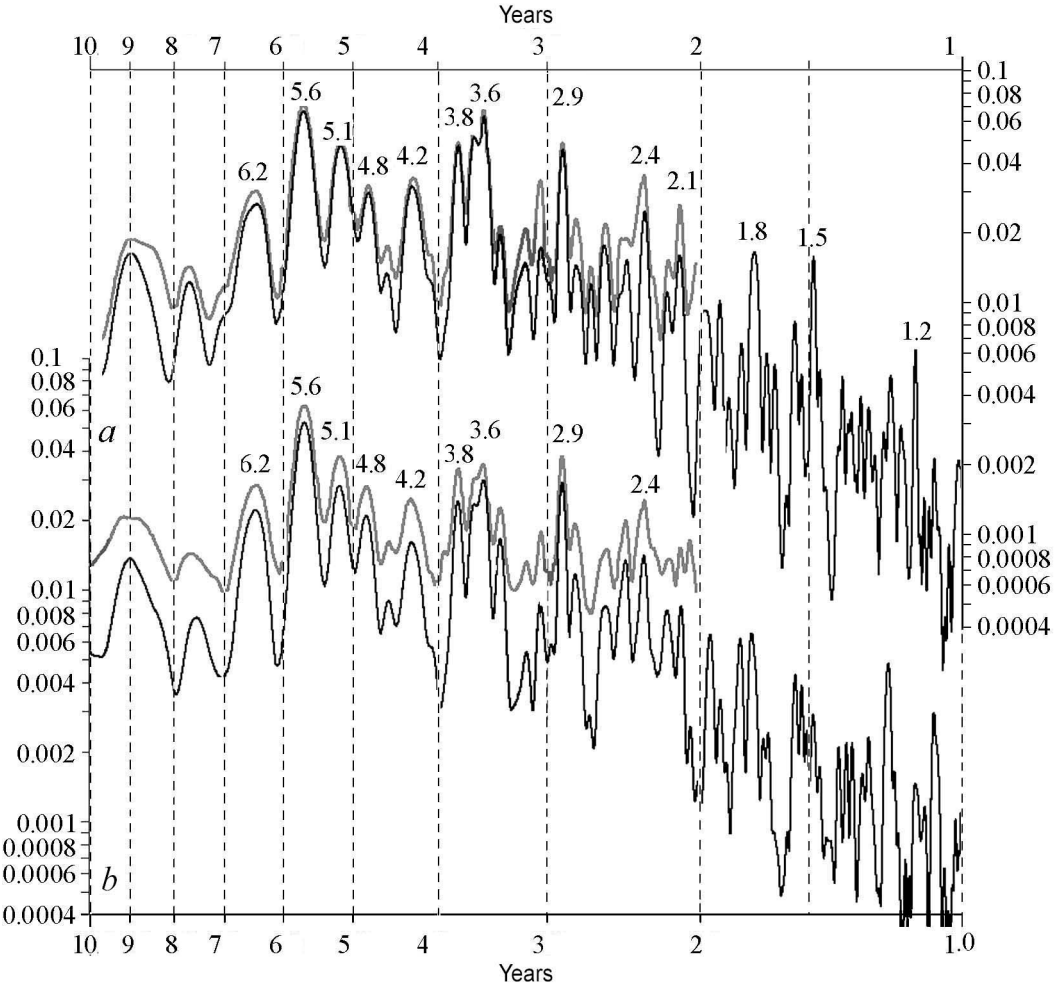


Рис. 2. Энергетические спектры рядов среднемесячных значений индексов РОИ (*a*) и ЭИЮК (*b*) за 1870–2014, рассчитанные на годовом периоде (светлая линия) и с максимальным разрешением (темная линия)

Fig. 2. Power spectra of the time series of the monthly mean values of EONI (*a*) and ESOI (*b*) represented as mappings on the annual period (grey line) as well as represented with maximal spectral resolution (dark line), and calculated over the 1870–2014 year period

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

значимости которых более 95 %. Из них значимость наиболее велика у пиков на периодах 3.5, 5.6, 2.8 и 1.4 года. Эти же пики являются главными на подробных спектрах РОИ и ЭИЮК (см. рис. 2). Только к ним добавился пик на периоде в 5.1 года, который в спектре [21] лишь немного не дотянул до уровня 95 %.

Для установления происхождения всех перечисленных полос и пиков повышенной спектральной плотности полезно учесть указание теории динамических систем о том, что сама по себе динамика автономных (с постоянными внешними силами) систем не в состоянии продуцировать пики спектральной плотности. Этот вопрос является принципиально важным для целей настоящего исследования. Поэтому поясним его чуть более подробно.

Дело в том, что энергетический спектр переменной z в знаменитой трехмодовой модели Е.Н. Лоренца со странным аттрактором [30] кажется содержащим дельта-пик. Это известно также относительно спектра другой известной модели со странным аттрактором (модели О.Е. Росслера [31]). Однако эти два исключения вызваны тем, что обе модели имеют группу симметрии: их решения определены с точностью до смены знаков модельных переменных. При этом, как показал сам Лоренц [32], пик в спектре переменной z является на самом деле очень узкой полосой повышенной спектральной плотности. Лоренц заключил, что это невероятно для автономной динамической системы – иметь пики в спектре после наступления хаоса. Иначе говоря, если группа симметрии отсутствует, каждый видимый в спектре пик должен быть связан с какой-то внешней периодической силой или являться комбинационной гармоникой нескольких таких сил.

В случае РОИ главную, значимую на 95-процентном уровне полосу повышенной спектральной плотности на периоде около 3.6 года, видимую в спектрах на рис. 1, легко связать с утроением периода известного чандлеровского колебания полюсов Земли, период которого примерно равен 1.2 года (435 дням). В работе [22] было отмечено, что в приэкваториальной зоне Земли доминирует полугодовой ход притока тепла от Солнца, и общий период воздействия на Эль-Ниньо трех чандлеровских колебаний примерно совпадает с общим периодом семи солнечных полугодовых воздействий. Это может привести к резонансу этих воздействий. Статистически значимые полосы повышенной спектральной плотности на периодах около 4.8 и 2.4 года соответствуют четырем периодам и двум периодам чандлеровского колебания. Описание физического механизма воздействия чандлеровского колебания на ритмичность Эль-Ниньо приведено в работе [33].

Заметим, что отношение годового периода к чандлеровскому периоду чрезвычайно близко к «очень» иррациональному числу 0.839... [34], поэтому в спектре РОИ должны существовать полосы повышенной спектральной плотности на комбинационных гармониках этих периодичностей между собой и с преобладающим собственным колебанием процессов ЭНЮК. Теория динамических систем указывает, что видимые в спектре полосы будут тем более многочисленны, чем несоизмеримее будет период наиболее неустойчивой собственной «моды» рассматриваемой динамической системы с обеими внешними периодичностями (отношения их периодов равны 1/1.839... и 0.839...).

Относительно возможного периода собственной «моды» ЭНЮК имеется работа [35], в которой, как вероятный, указан период 20 месяцев (около 1.7 года). Обращаясь к рис. 2, можно видеть, что вблизи этого периода действительно есть некоторое увеличение спектральной плотности (помечено как 1.8 года). Однако на

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

спектрах ЭИЮК рядом имеется не меньшее увеличение на периоде около 1.9 года. Сходные статистически значимые (уровень 95%) увеличения видны также в спектре работы [21]. Еще одна мощная полоса видна в спектрах, показанных на рис. 2 (и в спектре [21]) на периоде около 1.5 года. Какой из этих трех пиков надо считать главной собственной «модой» процессов ЭНЮК сказать трудно. Может быть, все они имеют право рассматриваться в этом качестве, ибо сейчас активно обсуждается вопрос о существовании нескольких разновидностей Эль-Ниньо. Не исключено, что каждой из них свойственна своя мода колебаний. Например, давно известно, что в конце 19 и начале 20 века, когда наблюдалось больше событий Эль-Ниньо восточного типа, преобладали более долгопериодные колебания, а во второй половине 20 века, когда стало появляться больше Эль-Ниньо центрального типа (названные «Модоки»), периоды колебаний несколько сократились.

Считая все эти собственные «моды» реальными, четвертая по мощности полоса на периоде 5.1 года, из числа видимых на рис. 2, может быть объяснена как комбинационная гармоника колебаний собственного периода 1.5 года и чандлеровского периода 1.2 года: $1/1.2 - 1/1.5 \approx 1/5.1$ в обратных годах.

Согласно Н.С. Сидоренкову [23], самые долгопериодные ритмы ЭНЮК определяются супергармониками лунно-солнечной нутации земных полюсов, период которой равен 18.6 лет. И спектры на рис. 2 это подтверждают, поскольку на них присутствуют пики на периодах, близких к 9.1 и 6.2 года, что соответствует 1:2 и 1:3 супергармоникам лунно-солнечной нутации. Однако эти пики не дотягивают до 95-процентного уровня статистической значимости. Возможным объяснением этого является недостаточная длина имеющихся рядов метеорологических данных.

Первый, третий и пятый по амплитуде пики на рис. 2, периоды которых примерно равны 5.6, 2.9 и 3.8 года, можно объяснить супергармониками 1:2, 1:4 и 1:3 11-летнего цикла солнечной активности. Заметим, что на возможную синхронизацию ритмичности ЭНЮК с солнечной активностью уже указывал ряд исследователей (см., в частности, [24, 25, 36]).

Здесь также можно обратить внимание на то, что вышеупомянутый в качестве одной из собственных «мод» период 1.5 года тоже может являться супергармоникой солнечного цикла 1:8. Это же можно сказать о других близких по периодам слабых полосах повышенной спектральной плотности. Например, пик на периоде 1.8 года есть супергармоника 1:2 самой главной из показанных на рис. 2 полос на периоде 3.6 года. Часто упоминаемая в литературе полоса на периоде 2.1 года может быть супергармоникой 1:2 уже упоминавшейся полосы на периоде 4.2 года. Полоса же на периоде 4.8 года, которая в [21] показана сильно недотягивающей до уровня значимости 95%, может быть субгармоникой 2:1 полосы на периоде 2.4 года, которая в [21] превосходит уровень значимости 95% и соответствует удвоенному чандлеровскому колебанию.

В работах [24, 25] было предположено, что частоты пиков второго порядка в атмосферных энергетических спектрах в диапазоне междугодовых временных масштабов можно вычислить по простому правилу: $\omega_{i\pm j} = 1/P_i \pm (j+1)/12$. Второе слагаемое в правой части этой формулы описывает вклады супергармоник годового хода притока тепла от солнца ($j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$), существующих на всех широтах, а первое слагаемое описывает вклады чандлеровского колебания полюсов, его удвоения и утроения (все периоды здесь задаются в месяцах). Все вышесказанное позволяет добавить к этому перечню частот те, которые возникают как супергармо-

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

ники 11-летнего цикла солнечной активности и лунно-солнечной нутации оси вращения Земли с периодом около 18.6 года. Наконец, хотя это и невозможно углядеть в реальных оценках спектров, должны существовать пики третьего и четвертого порядка, когда алгебраически складываются частоты всех четырех воздействующих внешних сил (годового хода притока тепла от солнца, 14-месячного чандлеровского колебания полюсов Земли, 11-летнего цикла солнечной активности и 18.6-летней лунно-солнечной нутации) и их суб- и супергармоник. В итоге, можно ожидать, что существует бесконечное, но счетное (могущее быть перенумерованным) множество пиков. Из-за ограниченности длин наблюдательных рядов и зашумленности их данных эти пики сливаются, образуя при реальных оценках энергетических спектров более или менее широкие полосы повышенной спектральной плотности.

Имеется ли непрерывное основание у рассматриваемого спектра РОИ, или существуют лакуны, разделяющие соседние полосы, внутри которых спектральная плотность является нулевой? Ответ на этот вопрос важен с точки зрения предсказуемости ЭНЮК: непрерывность спектра говорит о хаотичности и, следовательно, о непредсказуемости ЭНЮК на более или менее долгие сроки вперед. Современная практика прогнозирования ЭНЮК, как кажется, подтверждает такой пессимистический вывод. Но, может быть, все дело в неверной методологии сегодняшних прогностических моделей?

Для ответа на этот вопрос можно расширить использование общеизвестного теста статистической значимости оценок энергетического спектра против нулевой гипотезы «шума», спектр которого имеет вид $\omega = (1-\alpha^2)/(1+\alpha^2-2\alpha\cos(2\pi\omega/N))$, $\omega = 0, 1, ..., N/2$. Форма спектра существенно определяется величиной α, равной значению временной корреляции этого шума при единичном сдвиге. Если α равно нулю, то шум – «белый». Он тем больше «красный», чем больше α.

Временная корреляционная функция ряда среднемесячных значений РОИ показана на рис. 3. При временном сдвиге в один месяц ее значение равно 0.92, так что «шум» ЭНЮК можно было бы считать «красным», как это, в частности, было принято при проверке гипотезы о шумовой природе ЭНЮК в упоминавшейся выше работе [21]. Однако на рис. 3 видно, что при временных сдвигах более года корреляции резко затухают к нулю и остаются таковыми при дальнейшем увеличении сдвига. Так что, в целом для диапазона междугодовых временных масштабов «шум» ЭНЮК более правильно считать «белым». Принимая это, были рассчитаны спектры отображения РОИ и ЭИЮК на годовом периоде, осредненные для всех месяцев (см. рис. 2, светлые линии). Все эти спектры обнаруживают пики на периодах, которые были перечислены ранее при рассмотрении спектров среднемесячных значений РОИ и ЭИЮК, показанных на рис. 2 (темные линии). На рис. 4 приведены спектры отдельно для месяцев с октября по февраль, во время которых события Эль-Ниньо обычно достигают максимальной фазы своего развития, вместе со средним спектром для этих месяцев. Спектры «белого» шума, рассчитанные по выше приведенной формуле при $\alpha = 0$, представлены на рис. 5.

Для проверки нулевой гипотезы о шумовой природе энергетических спектров по таблице распределения χ^2 находится значение 95-процентного квантиля при соответствующем числе степеней свободы. Однако с равным основанием такая проверка может быть применена к лакунам спектральной плотности. Для этого необходимо найти 5-процентный квантиль. Это было сделано, и на рис. 1 показаны оба квантиля. Они показывают, что не только наиболее мощные пики в спектрах рассматриваемых

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

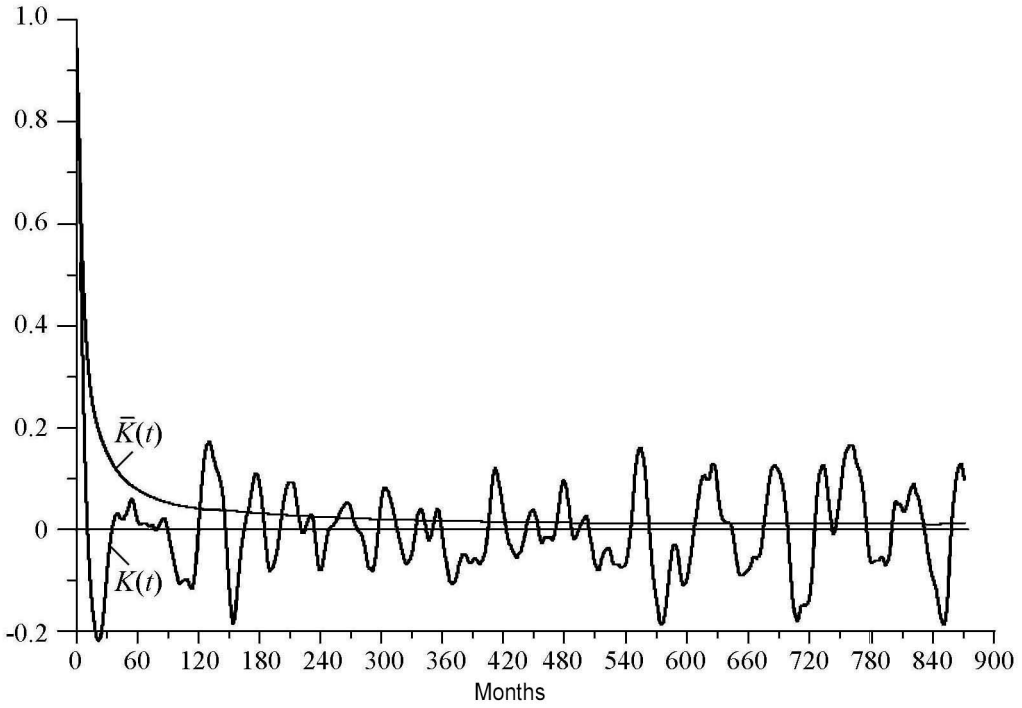


Рис. 3. Временная корреляционная функция среднемесячных значений РОИ за 1870–2014 гг. ($K(t)$) и ее накопленная сумма квадратов ($\bar{K}(t)$)

Fig. 3. Temporal correlation function of the monthly mean values of EONI calculated over the 1870–2014 year period ($K(t)$), and the squared accumulated sum of this function ($\bar{K}(t)$)

индексов превосходят уровень 95-процентного квантиля, но и некоторые лакуны в этих спектрах опускаются ниже 5-процентного квантиля. Оба эти факта позволяют отвергнуть гипотезу о шумовой природе рассматриваемых спектров.

Чтобы окончательно отвергнуть эту гипотезу и признать рассматриваемый спектр состоящим из дискретного множества пиков спектральной плотности, был вычислен средний спектр отображения РОИ на годовом периоде для всех месяцев года. Он показан на рис. 5 вместе со спектрами, вычисленными по двенадцати случайным реализациям «белых» шумов, соответствующих всем месяцам года. Еще более наглядно, чем в случае использования χ^2-аппроксимаций распределений выборочных оценок спектральной плотности, видно, что многие пики и многие лакуны в рассматриваемом спектре РОИ выходят за пределы, ограничивающие оценки спектральных плотностей для «белого» шума.

Возвращаясь к временной корреляционной функции, показанной на рис. 3, укажем на ее свойство осциллировать при больших временных сдвигах вокруг нуля с неубывающим размахом (в пределах примерно $+0.2$). Незатухающие осцилляции временных корреляций присущи периодическим и квазипериодическим временным рядам. Однако, в работе [37] было указано, что это может быть свойственно также так называемой странной нехаотической динамике. Чтобы различать эти случаи, в этой же работе было рекомендовано строить график накопленных сумм квадратов временных корреляций. Если динамика периодична или квазипериодична, то эта накопленная сумма не убывает с ростом временного сдвига, если же динамика более сложна, то она убывает, приближаясь к нулю. На рис. 3 видно, что именно этот последний случай имеет место для временных корреляций ЭНЮК.

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

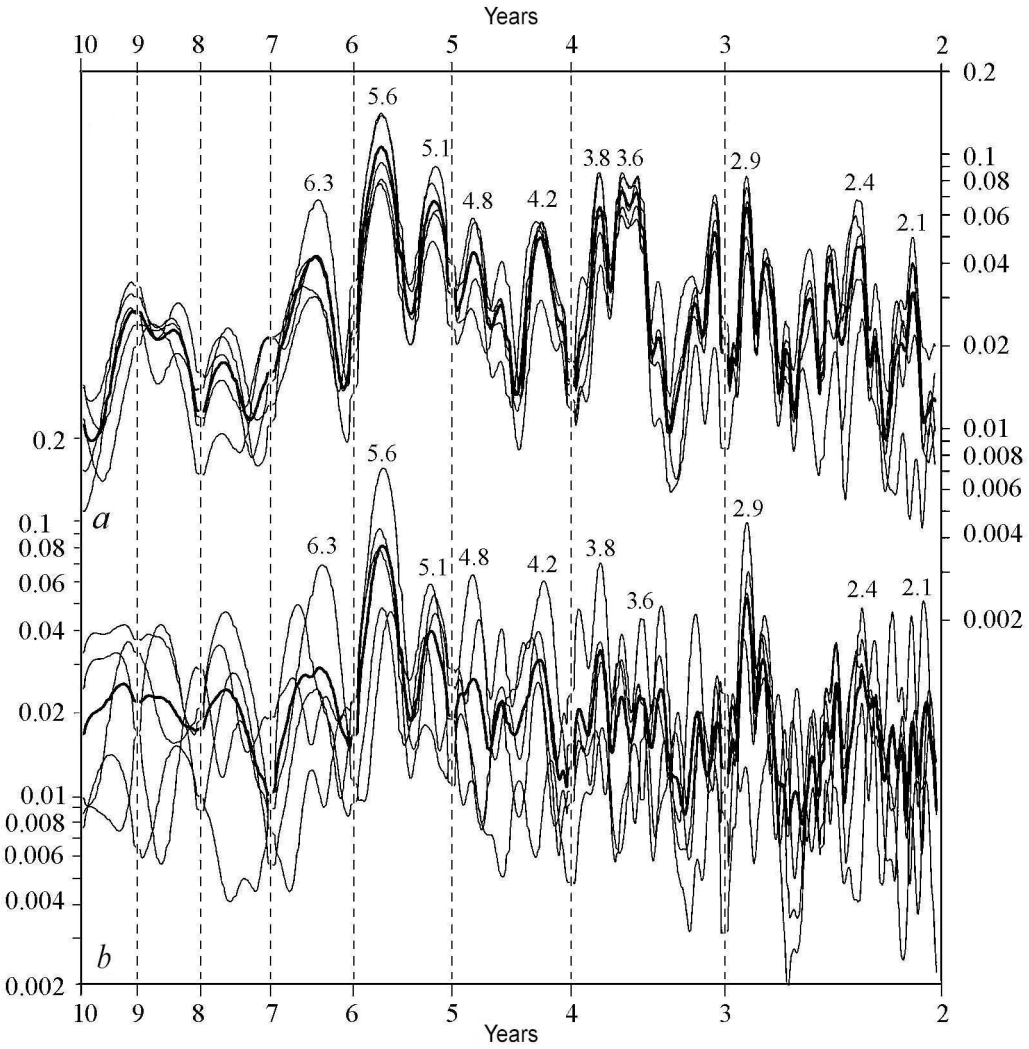


Рис. 4. Энергетические спектры отображения на годовом периоде значений индексов РОИ (*а*) и ЭИЮК (*б*) для месяцев с октября по февраль (тонкие линии) и их средние значения (толстые линии)

Fig. 4. Power spectra of the mappings on the annual period of EONI (*a*) and ESOI (*b*) for separate months from October to February (thin lines), and their mean values (fat lines)

Другой путь получения ответа на поставленный вопрос о непрерывности или дискретности энергетических спектров квазипериодически форсированных нелинейных динамических систем указан в работах [38, 39]. Он состоит в рассмотрении соотношения между мощностями пиков спектральной плотности и их порядковыми номерами (пики должны быть упорядочены по убыванию их мощности). Рис. 6 показывает, как выглядит это соотношение для среднего из пяти спектров отображений РОИ, соответствующих холодному периоду года северного полушария, когда изменчивость РОИ наиболее велика (октябрь–февраль). Среднее соотношение было вычислено методом наименьших квадратов и описывается полиномом третьего порядка. Вообще говоря, это должно указывать на квазипериодичность динамики ЭНЮК, ибо в случаях странной нехаотичности и детерминированного хаоса это среднее должно быть прямой линией в двойном логарифмическом масштабе. Однако, какой именно является динамика ЭНЮК, сказать трудно, ибо наибольшее откло-

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

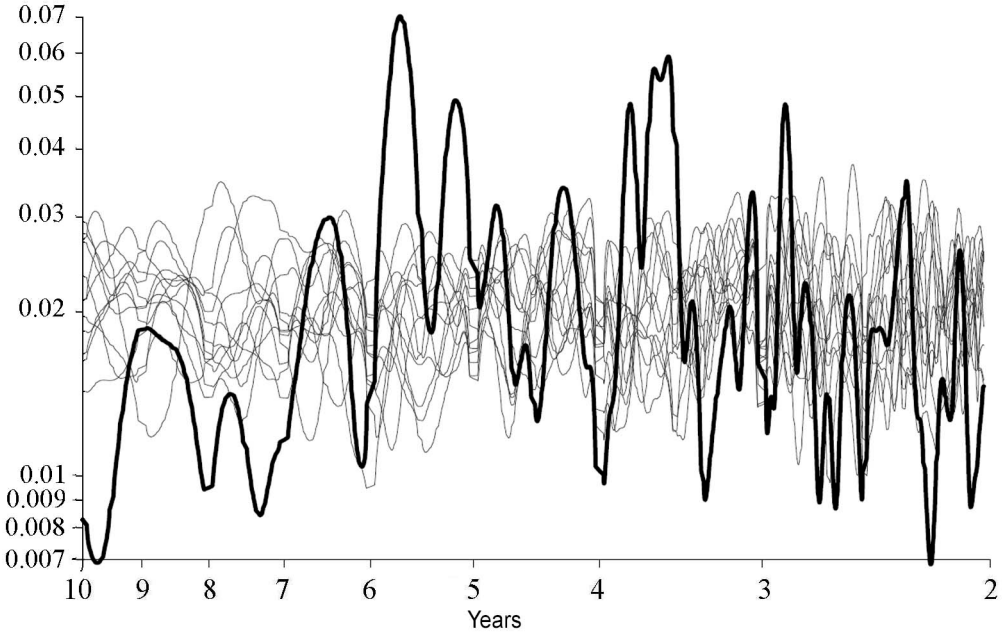


Рис. 5. Средний энергетический спектр отображения на годовом периоде РОИ для всех месяцев года, рассчитанный методом быстрого преобразования Фурье (толстая линия), и рассчитанные тем же методом спектры 12 реализаций отображения «белого» шума (тонкие линии)

Fig. 5. The mean power spectrum of the mappings on the annual period for EONI for all months calculated by means of the FFT-method (fat line) and power spectra of the twenty realizations of the respective mapping of the white noise (thin lines)

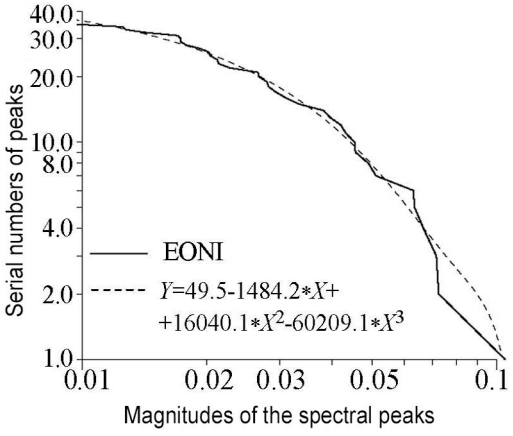


Рис. 6. Соотношение между логарифмами мощности (ось абсцисс) и порядкового номера пиков (ось ординат) в энергетических спектрах отображений РОИ на годовом периоде в среднем для октября–февраля (жирная линия). Аппроксимация этого соотношения описывается полиномом третьего порядка (пунктирная линия)

Fig. 6. The mean relationship between logarithms of the spectral peak magnitudes (abscissa) and serial numbers of these peaks (ordinate) in the power spectra of the EONI-mappings for October – February (fat line). An approximation of this relationship also is shown as it represented by a cubic polynomial (dotted line)

нение среднего графика от прямой линии имеет место в его левой верхней части, а не в правой нижней части, которую определяют самые мощные пики спектральной плотности, и что требуется согласно существующей теории странной нехаотичности [38, 39].

В любом случае – «простой» квазипериодичности или странной нехаотичности – полученный результат указывает на принципиальную возможность долгосрочных (на годы вперед) прогнозов ЭНЮК.

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

Заключение

Результаты настоящего исследования состоят в следующем.

- Опираясь на методологию математической теории нелинейных динамических систем с квазипериодическим внешним форсированием, детально исследованы энергетические спектры процессов ЭНЮК. При этом найдено, что все основные пики, точнее – полосы повышенной спектральной плотности, могут быть истолкованы как результаты откликов глобальной климатической системы на совокупное воздействие годового хода притока тепла от Солнца и еще трех внешних сил, периоды которых существенно несоизмеримы с годовым периодом.
- Одна часть полос повышенной спектральной плотности отнесена к субгармоникам чандлеровского колебания полюсов Земли. Вторая часть – к супергармоникам лунно-солнечной нутации, а третья часть – к супергармоникам 11-летнего цикла солнечной активности. Подтверждена статистическая значимость этих полос, уже предполагавшаяся многими исследователями.
- На основе специальных рассмотрений структуры энергетических спектров ЭНЮК получено свидетельство дискретности энергетических спектров ЭНЮК, то есть их нехаотичности, никем ранее не предполагавшейся.
- Из дискретности энергетических спектров ЭНЮК следует принципиальная возможность долгосрочных (на годы вперед) предсказаний ЭНЮК.

Исследование выполнено частично при финансовой поддержке по гранту Российского научного фонда (проект №14-50-00095).

Библиографический список

1. *Kurzbach J.E., Bryson R.A.* Variance spectrum of Holocene climatic fluctuations in the North Atlantic sector // J. Atmoc. Sci. 1974. Vol. 183. No.4126. P. 709–714.
2. *Mitchell J.M.* Note on solar variability and volcanic activity as potential sources of climatic variability // In: The Physical Basis of Climate and Climate modeling. GARP Bull. Series. 1975. No.16. P. 127–131.
3. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 407 с.
4. *Pelletier J.* The power-spectral density of atmospheric temperature from time scales of 10^{-2} to 10^{6} yr // Earth Planetary Sci. Lett. 1998. Vol. 158. P. 157–164.
5. *Huybers P., Curry W.* Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability // Nature. 2006. Vol. 441. P. 329–332.
6. *Вакуленко Н.В., Иващенко Н.Н., Котляков В.М. и др.* О бифуркации умножения периода ледниковых циклов в начале плейстоцена // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 4. С. 541–544.
7. *Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М.* Свидетельство скорого окончания современного межледниковья // Доклады АН. 2013. Т. 452. № 1. С. 92–95.
8. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М.* Об увеличении изменчивости глобального климата примерно за 400 тыс. лет до настоящего времени // Доклады АН. 2014. Т. 456, № 5. С. 600–603.

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

9. *Вакуленко Н.В., Иващенко Н.Н., Котляков В.М. и др.* О бифуркациях умножения периода ледниковых циклов в плиоцене – плейстоцене // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т. 21, № 2. С. 88–112.
10. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М.* Предсказуем ли климат в геологическом масштабе времени? // Доклады АН. 2015. Т. 460, № 1. С. 215–219.
11. *Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. et al.* On bifurcations inducing glacial cycle lengthening during Pliocene/Pleistocene epoch // Intern. J. Bifurcation and Chaos. 2014. Vol. 24, No. 8. 1440018 (8 pages).
12. *Jin F.F., Neelin J.D., Ghil M.* El Nino on the devil's: annual subharmonic steps to chaos // Science. 1994. Vol. 264. P. 70–72.
13. *Jin F.F., Neelin J.D., Ghil M.* El Nino/Southern Oscillation and the annual cycle: Subharmonic frequency locking and aperiodicity // Physica D. 1996. Vol. 98. P. 442–465.
14. *Tziperman E., Stone L., Cane M.A. et al.* El Nino chaos: overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean – atmosphere oscillator // Science. 1994. Vol. 264. P. 72–74.
15. *Tziperman E., Zebiak S.E., Cane M.A.* Mechanisms of seasonal – ENSO interaction // J. Atmos. Sci. 1997. Vol. 54. P. 61–71.
16. *Tziperman E., Cane M.A., Zebiak S.E. et al.* Locking of El Nino's peak time to the end of the calendar year in the delayed oscillator picture of ENSO // J. Climate. 1998. Vol. 9. P. 2191–2199.
17. *Eccles F., Tziperman E.* Nonlinear effects on ENSO's period // J. Atmos. Sci. 2004. Vol. 61. P. 474–482.
18. *Сонечкин Д.М.* Стохастичность в моделях общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 280 с.
19. *Даценко Н.М., Зимин Н.Е.* Динамические проявления резонансного возбуждения долгопериодных колебаний в модели с сезонным термическим форсированием // Труды Гидрометцентра СССР. 1987. Вып. 290. С. 111–127.
20. *Виноградская А.А., Власова И.Л., Даценко Н.М., Сонечкин Д.М.* Теория годового хода зональной циркуляции атмосферы, II. Четырнадцатимодовая модель суб- и супергармонических резонансов // Труды Гидрометцентра СССР. 1988. Вып. 297. С. 166–174.
21. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1997. Vol. 79, No.1. P. 61–78.
22. *Sonechkin D.M., Ivashchenko N.N.* On the role of a quasiperiodic forcing in the interannual and interdecadal climate variations // CLIVAR Exchanges. 2001. Vol. 6, No.1. P. 5–6.
23. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. 2002. СПб.: Гидрометеоиздат, 200 с.
24. *Currie R.G., Hameed S.* Evidence of quasi-biennial oscillations in a general circulation model // Geophys. Res. Lett. 1988. Vol. 15. P. 649–652.
25. *Hameed S., Currie R.G., LaGrone H.* Signals in atmospheric pressure variations

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

from 2 to $\sim$ 70 months: Part 1. Simulations by two coupled ocean-atmosphere GCMs // Intern. J. Climatol. 2007. Vol. 15. No. 8. P. 853–871.

26. *Allan R.J., Ansell, T.J.* A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004 // J. Climate. 2006. Vol. 19. P. 5816–5846.
27. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, No. D14, 4407 10.1029/2002JD002670.
28. *Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al.* The Twentieth Century Reanalysis Project // Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. 137. P. 1–28.
29. *Braganza, K., Gergis J.L., Power S.B., Risbey J.S., Fowler A.M.* A multiproxy index of the El Nino–Southern Oscillation, A.D. 1525–1982 // J. Geophys. Res. 2009. 114. D05106.
30. *Lorenz E.N.* Deterministic nonperiodic flow // J. Atmos. Sci. 1963. Vol. 20. P. 130–141.
31. *Roessler O.E.* Continuous chaos // In: Synergetics, Proceedings Intern. Workshop, Schloss Elmar, Bavaria, 1977: Berlin, 1977. P. 184–197.
32. *Lorenz E.N.* A very narrow spectral band // J. Statist. Phys. 1984. Vol. 36, No.1–2. P. 1–14.
33. *Серых И.В., Сонечкин Д.М.* О влиянии полюсного прилива на Эль-Ниньо // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 44–52.
34. *Kim S.-H., Ostlund S.* Renormalization of mappings of the two-torus // Physical Review Letters. 1985. Vol. 55. No.1. P. 1165–1168.
35. *Tsonis A.A., Roebber P.J., Elsner J.B.* A characteristic time scale in the global temperature record // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. No.15. P. 2821–2823.
36. *Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М.* Свидетельство влияния солнечной активности на Эль-Ниньо – Южное колебание // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 994–999.
37. *Feudel U., Kuznetsov S., Pikovsky A.* Strange nonchaotic attractors. Singapore: World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A. 2006. Vol. 56.
38. *Bondeson A., Ott E., Antonsen T.M.* Quasiperiodic forced damped pendula and Schroedinger equations with quasiperiodic potentials: implications of their equivalence // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. No. 20. P. 2103–2106.
39. *Ditto W.L., Spano M.L., Savege H.T. et al.* Experimental observation of a strange nonchaotic attractor // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. No.5. P. 533–536.

References

1. Kurzbach J.E., Bryson R.A. Variance spectrum of Holocene climatic fluctuations in the North Atlantic sector. *J. Atmoc. Sci.* 1974. Vol. 183. No.4126. P. 709–714.
2. Mitchell J.M. Note on solar variability and volcanic activity as potential sources of climatic variability. *The Physical Basis of Climate and Climate modeling. GARP Bull. Series.* 1975. No. 16. P. 127–131.

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

3. Monin A.S., Shishkov Yu.A. Istoriya klimata. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 407 s. (in Russian).
4. Pelletier J. The power-spectral density of atmospheric temperature from time scales of 10^{-2} to 10^{6} yr. *Earth Planetary Sci. Lett.* 1998. Vol. 158. P. 157–164.
5. Huybers P., Curry W. Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability. *Nature.* 2006. Vol. 441. P. 329–332.
6. Vakulenko N.V., Sonechkin D.M., Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M. On periods of multiplying bifurcation of early Pleistocene glacial cycles. *Doklady Earth Sciences.* 2011. Vol. 436. No.2. P. 245–248.
7. Vakulenko N.V., Sonechkin D.M. Evidence of the upcoming end of the contemporary interglacial. *Doklady Earth Sciences.* 2013. Vol. 452. No. 1. P. 926–929.
8. Vakulenko N.V., Sonechkin D.M., Kotlyakov V.M. Increase in the global climate variability from about 400 ka bp until present. *Doklady Earth Sciences.* 2014. Vol. 456. No.2. P. 745–748.
9. Vakulenko N.V., Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. On the period-multiplying bifurcation of glacial cycles in the Pliocene – Pleistocene. *Izvestiya VUZ. Applied nonlinear dynamics.* 2013. Vol. 21. No. 2. S. 88–112 (in Russian).
10. Vakulenko N.V., Sonechkin D.M., Kotlyakov V.M. Is climate predictable on a geological time scale? *Doklady Earth Sciences.* 2015. Vol. 460. No.1. P. 68–72.
11. Ivashchenko N.N., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. et al. On bifurcations inducing glacial cycle lengthening during Pliocene/Pleistocene epoch. *Intern. J. Bifurcation and Chaos.* 2014. Vol. 24. No.8. 1440018 (8 pages).
12. Jin F.F., Neelin J.D., GhilM. El Nino on the devil's: annual subharmonic steps to chaos. *Science.* 1994. Vol. 264. P. 70–72.
13. Jin F.F., Neelin J.D., Ghil M. El Nino/Southern Oscillation and the annual cycle: Subharmonic frequency locking and aperiodicity. *Physica D.* 1996. Vol. 98. P. 442–465.
14. Tziperman E., Stone L., Cane M.A. et al. El Nino chaos: overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean – atmosphere oscillator. *Science.* 1994. Vol. 264. P. 72–74.
15. Tziperman E., Zebiak S.E., Cane M.A. Mechanisms of seasonal – ENSO interaction. *J. Atmos. Sci.* 1997. Vol. 54. P. 61–71.
16. Tziperman E., Cane M.A., Zebiak S.E. et al. Locking of El Nino's peak time to the end of the calendar year in the delayed oscillator picture of ENSO. *J. Climate.* 1998. Vol. 9. P. 2191–2199.
17. Eccles F., Tziperman E. Nonlinear effects on ENSO's period. *J. Atmos. Sci.* 2004. Vol. 61. P. 474–482.
18. Sonechkin D.M. Stokhastichnost' v modelyakh obshchey tsirkulyatsii atmosfery. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 280 s. (in Russian).
19. Datsenko N.M., Zimin N.E. *Proceedings of the USSR Hydrometeorological Center*. 1987. Issue. 290. S. 111–127 (in Russian).
20. Vinogradskaya A.A., Vlasova, Datsenko N.M., Sonechkin D.M. *Proceedings of the USSR Hydrometeorological Center*. 1988. Issue. 297. S. 166–174 (in Russian).

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

21. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. Vol. 79, No.1. P. 61–78.
22. Sonechkin D.M., Ivashchenko N.N. On the role of a quasiperiodic forcing in the interannual and interdecadal climate variations. *CLIVAR Exchanges.* 2001. Vol. 6, No.1. P. 5–6.
23. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. 2009. Wiley-VCH & Co. KCaA, Weinheim, 305 p.
24. Currie R.G., Hameed S. Evidence of quasi-biennial oscillations in a general circulation model. *Geophys. Res. Lett.* 1988. Vol. 15. P. 649–652.
25. Hameed S., Currie R.G., LaGrone H. Signals in atmospheric pressure variations from 2 to $\sim$ 70 months: Part 1. Simulations by two coupled ocean-atmosphere GCMs. *Intern. J. Climatol.* 2007. Vol. 15. No.8. P. 853–871.
26. Allan R.J., Ansell T.J. A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850–2004. *J. Climate.* 2006. Vol. 19. P. 5816–05846.
27. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, No. D14, 4407 10.1029/2002JD002670.
28. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.* 2011. 137. P. 1–28.
29. Braganza, K., Gergis J.L., Power S.B., Risbey J.S., Fowler A.M. A multiproxy index of the El Nino–Southern Oscillation, A.D. 1525–1982. *J. Geophys. Res.* 2009. 114. D05106.
30. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* 1963. Vol. 20. P. 130–141.
31. Roessler O.E. Continuous Chaos. In: Synergetics, Proceedings Intern. Workshop, Schloss Elmar, Bavaria, 1977: Berlin, 1977. P. 184–197.
32. Lorenz E.N. A very narrow spectral band. *J. Statist. Phys.* 1984. Vol. 36. No. 1–2. P. 1–14.
33. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Confirmation of the oceanic pole tide influence on El Niño. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* 2016. Vol. 13, No.2. S. 44–52 (in Russian).
34. Kim S.-H., Ostlund S. Renormalization of mappings of the two-torus. *Physical Review Letters.* 1985. Vol. 55, No.1. P. 1165–1168.
35. Tsonis A.A., Roebber P.J., Elsner J.B. A characteristic time scale in the global temperature record // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, No.15. P. 2821–2823.
36. Vakulenko N.V., Sonechkin D.M. Evidence of the solar activity's effect on El Nino – Southern oscillation // *Oceanology.* 2011. Vol. 51, No. 6. P. 935–939.
37. Feudel U., Kuznetsov S., Pikovsky A. Strange nonchaotic attractors. Singapore: *World Scientific Series on Nonlinear Science*, Series A. 2006. Vol. 56.

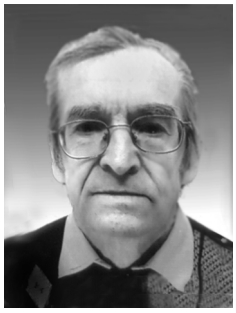
© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*

38. Bondeson A., Ott E., Antonsen T.M. Quasiperiodic forced damped pendula and Schroedinger equations with quasiperiodic potentials: implications of their equivalence // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. No. 20. P. 2103–2106.

39. Ditto W.L., Spano M.L., Savege H.T. et al. Experimental observation of a strange nonchaotic attractor // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 65. No 5. P. 533–536.

Серых Илья Викторович – родился в Москве (1983), окончил факультет ВМК Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (2006). После окончания МГУ работает в Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук. Защитил в ИО РАН диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2009) в области теории колебаний климата, изменчивости гидрофизического режима Мирового океана, применения нелинейной динамики в исследовании климатических изменений. Опубликовал 20 научных статей по направлениям, указанным выше.

117997 Москва, Нахимовский проспект д. 36
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
E-mail: iserykh@ocean.ru



Сонечкин Дмитрий Михайлович – родился в Москве (1937), окончил географический факультет МГУ по кафедре метеорологии и климатологии, после чего работал как синоптик-прогнозист в Центральном институте прогнозов Гидрометеорологической службы СССР, а с начала 1960-х годов участвовал в работах по созданию метеорологической космической системы «Метеор». В 1970-х годах организовал в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре СССР лабораторию динамико-стохастических методов для применения идей и методов современной теории нелинейных динамических систем к задачам численного долгосрочного прогноза погоды и динамики климата. В начале 2000-х годов перешел на работу в Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, продолжая участвовать в работах лаборатории динамико-стохастических методов в Гидрометцентре России. В настоящее время является также приглашенным профессором в Институте исследований окружающей среды холодных и засушливых регионов Китайской академии наук. Доктор физико-математических наук, профессор, академик РАЕН. Научные интересы: теоретические проблемы долгопериодных колебаний в климатической системе; численный долгосрочный прогноз погоды; современное изменение климата; реконструкции и исследования динамики климатов прошлого. Автор монографий: Метеорологическое дешифрирование космических снимков Земли (количественные методы). Л.:Гидрометеоиздат, 1979; Стохастичность в моделях общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984; Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005 (в соавторстве с А.С. Мониным); Хаос и порядок в динамике погоды и климата. Водный и тепловой балансы тропосферы. С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 2005 (в соавторстве с Р.Ф. Бурлуцким). Общее количество публикаций – более 200.

117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России
E-mail: dsonech@ocean.ru

© *И.В. Серых, Д.М. Сонечкин*