УДК 551.465

Хаос и порядок в атмосферной динамике

Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо

Н. В. Вакуленко¹, И. В. Серых¹, Д. М. Сонечкин^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский проспект д. 36

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13

Email: vanava139@yandex.ru, iserykh@ocean.ru, dsonech@ocean.ru

Поступила в редакцию 2.03.2018, принята к публикации 20.04.2018

Тема. Опираясь на предположение, что короткопериодные климатические вариации нехаотичны, и, следовательно, к этим вариациям не применима парадигма ограниченной предсказуемости погоды, сформулированная Э.Н. Лоренцем, ставится вопрос о неограниченной предсказуемости короткопериодных вариаций климата. Это принципиально отличается от общепринятого в климатологии представления о неустойчивости атмосферных движений всех временных масштабов, начиная от изменений погоды ото дня ко дню и включая многолетние, многовековые и даже тысячелетние вариации климата. **Цель.** Конкретно, рассматриваются межгодовые масштабы, и специально исследуется предсказуемость широко известного феномена Эль-Ниньо. При этом рассматривается недавно обнаруженная так называемая Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО), которая представляет собой синхронизованную совокупность хорошо известных процессов в тропиках, связанных с Эль-Ниньо, и внетропических процессов. **Метод.** Считая ГАО главной модой короткопериодных климатических вариаций, определяются индексы, характеризующие динамику самого ГАО и взаимосвязи внетропических и тропических компонент ГАО друг с другом. Оказывается, что между этими индексами имеется столь тесная кросскорреляция, что ее можно считать проявлением взаимно-однозначных связей между тропическими и внетропическими компонентами ГАО. **Результаты.** Это позволяет положительно ответить на поставленный вопрос о нехаотичности вариаций климата. Среди индексов, характеризующих ГАО, находится один, с помощью которого оказывается возможным предсказывать Эль-Ниньо с заблаговременностью в 14 месяцев. Затем, с помощью специально разработанной техники кроссвейвлетного анализа пар временных рядов, выявляется диапазон временных масштабов, внутри которого имеет место наиболее тесная кросскорреляция этого индекса с индексом, характеризующим Эль-Ниньо. Этот диапазон включает в себя масштабы всех известных ритмов Эль-Ниньо, то есть от двух до примерно 16 лет. **Обсуждение.** В итоге указывается на возможность дальнейшего увеличения этой заблаговременности до нескольких лет. Это много больше, чем заблаговременности всех ныне существующих динамических и статистических методов прогноза Эль-Ниньо.

Ключевые слова: нехаотические короткопериодные климатические вариации, вейвлетный анализ, предсказуемость Эль-Ниньо.

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>

Образец цитирования: Вакуленко Н.В., Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 4. С. 75–94.

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>

Chaos and order in atmospheric dynamics

Part 3. Predictability of El Niño

N.V. Vakulenko¹, I.V. Serykh¹, D.M. Sonechkin^{1,2}

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovskiy prospect, 117997 Moscow, Russia

²Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation
11-13 Bol'shoi Predtechenskii per., 123242 Moscow, Russia
Email: vanava139@yandex.ru, iserykh@ocean.ru, dsonech@ocean.ru
Received 2.03.2018; accepted for publication 20.04.2018

Topic. Based on the assumption that short-term climatic variations are nonchaotic, and, therefore, the paradigm of the limited predictability of weather formulated by E.N. Lorenz is not applicable to these variations, a question is posed about the unlimited predictability of the short-term climatic variations. It differs from the opinion generally accepted in climatology now that atmospheric motions of all time scales, beginning from daily weather variations, and including interannual, centennial and even millennial variations of climate are unstable. **Aim.** Specifically, the interannual scales are considered in this paper, and the predictability of the well-known phenomenon of El Niño is investigated. For this purpose, the so-called Global Atmospheric Oscillation (GAO) is considered which has been recently recognized by climatologists. GAO represents a synchronized integrity of the well-known processes in tropics connected with El Niño, and some extratropical processes. **Method.** Assuming GAO to be the main mode of the short-term climatic variations, some indices are defined which characterize the dynamics of GAO itself as well as the interrelations between the extratropical and tropical components of GAO with each other. It turns out that crosscorrelations exist between these indices which are so high that they may be considered as evidences of some one-to-one relationships between the tropical and the extratropical components of GAO. **Results.** It allows give a positive answer to the question posed on nonchaoticity of the short-term climatic variations. Among the indices characterizing GAO there is one by means of which it is possible to predict El Niño with the lead time of 14 months. Then, by means of a specially designed technique of the crosswavelet analysis of pairs of time series, a range of time scales is found in which the closest crosscorrelations exist of the index-predictor with an index characterizing El Niño itself. This time scale range includes within itself all known El Niño rhythms, i.e. the time periods from 2 to about 16 years. **Discussion.** As a result, it is indicated a possibility of a further increase in the lead time of the of El Niño prediction up to several years. It is much more, than the lead times of all present-day hydrodynamical and statistical forecasts of El Niño.

Key words: nonchaotic short-term climatic variations, wavelet analysis, predictability of El Niño.

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>

Reference: Vakulenko N.V., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 3. Predictability of El Niño. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 75–94. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>

Введение

Прогноз погоды издавна был основной практической целью исследований физики атмосферных процессов. Сначала такие предсказания делались с помощью самых различных эмпирических приемов. Однако в 30-е годы XX века выдающийся отечественный гидродинамик И.А. Кибель предложил использовать для этого уравнения гидродинамики с учетом так называемого ускорения Кориолиса, учитывающего вращение Земли [1]. Ранее такие уравнения уже пытался использовать для про-

гноза погоды американец Л.Ф. Ричардсон [2]. К сожалению, после долгих расчетов с помощью арифмометра, Ричардсон составил прогноз на завтра, который оказался совершенно ошибочным. Причиной ошибки оказались быстрые гравитационные и звуковые волны, которые описывались гидродинамическими уравнениями, которые использовал Ричардсон, наряду с погодообразующими волнами. Достижением Кибеля было то, что он предложил видоизменение уравнений гидродинамики атмосферы, исключаящее из рассмотрения быстрые волны и описывающее только погодообразующие волны. На западе это достижение связывают с именем американца Дж. Чарни [3]. Однако его работы были сделаны в конце 1940-х годов, то есть на десятилетие позже работ Кибеля.

Предложение Кибеля стало возможно реализовать только в 1950-х годах, когда появились первые электронные вычислительные машины (ЭВМ). По мере увеличения мощности ЭВМ, гидродинамические модели для численного прогноза погоды становились все более детальными. Поэтому прогнозы погоды быстро совершенствовались. Но в 1960-е годы это совершенствование начало замедляться. Метеорологи-прогнозисты выяснили, что их прогнозы более или менее хороши только на первые сутки прогноза. Потом качество прогнозов начинает падать и для заблаговременности в три-пять дней прогнозы совсем теряют связь с реальностью. Возникло подозрение, что, как бы ни увеличивалась мощность ЭВМ, достигаемая за счет этого детализация прогностических гидродинамических моделей не способна привести к увеличению заблаговременности надежных прогнозов, то есть у гидродинамических прогнозов существует некий практически непреодолимый предел предсказуемости.

1. Парадигма хаотичности и ограниченной предсказуемости атмосферных процессов

Теоретическое обоснование существования такого предела было дано в серии работ, опубликованных в 1960-е годы американским метеорологом-теоретиком Э.Н. Лоренцем. В своей знаменитой статье «Детерминированное непериодическое течение» [4] Лоренц построил математическую конструкцию, которую позднее называли странным аттрактором. С помощью этой конструкции Лоренц объяснил, как, несмотря на отсутствие каких-либо случайных внешних воздействий, даже идеальная гидродинамическая модель атмосферы ведет себя так, что уже малые неточности в задании начального ее состояния (они неизбежны из-за неполноты и неточности метеорологических наблюдений) фатально сказываются на составляемых с ее помощью прогнозах погоды.

На основе этого наблюдения Лоренц сформулировал парадигму хаотичности и ограниченной предсказуемости погодообразующих процессов. Фундаментальной математической причиной хаотичности является квадратичная нелинейность уравнений гидродинамики. Физически это означает, что движение жидкости определяется полем давления. Но движение само меняет это поле. Изменившееся поле давления определяет следующие изменения в поле движения и т.д.

Парадигму Лоренца позднее распространили и на более долгопериодные атмосферные вариации (вариации климата). Вообще говоря, для этого не было достаточных оснований. Действительно, численные гидродинамические модели долгосрочного (на месяц, сезон) прогноза погоды, которые в СССР начала создавать еще в

середине XX века Е.Н. Блинова [5], были линейными. Позднее стали использовать нелинейные модели, которые принципиально не отличались от моделей краткосрочного прогноза. Выходной продукт этих моделей просто усредняли по времени, надеясь, что недельный предел предсказуемости погоды не скажется на «климате» этих моделей. К сожалению, это ожидание не оправдалось. Вплоть до настоящего времени долгосрочные прогнозы погоды, как и предсказания короткопериодных вариаций климата, например, предсказания Эль-Ниньо, остаются мало успешными. Однако причина этого, по-видимому, состоит не в хаотичности климатических вариаций.

Причина хаотичности вариаций погоды состоит в том, что очень малые неточности в задании начальных условий при интегрировании прогностических гидродинамических моделей укрупняются и примерно через неделю становятся соизмеримыми с реально существующими крупномасштабными особенностями прогнозируемых метеорологических полей. Дальнейшее интегрирование становится бесполезным, то есть наступает предел предсказуемости.

Укрупнение ошибок прогноза обеспечивается существованием восходящего каскада энергии, то есть потока энергии, направленного от малых к большим масштабам атмосферных движений. Признаками этого каскада являются гладкие графики пространственных и временных энергетических спектров атмосферных движений с наклоном, примерно равным минус двум. Уже давно было установлено [6], что в пространственных спектрах этот каскад начинается в масштабах порядка 1000 километров, то есть на характерном размере циклонов, и охватывает все масштабы вплоть до планетарного.

Во временных спектрах каскад начинается на временах порядка нескольких дней, то есть на характерном времени жизни циклонов, но охватывает лишь ограниченный диапазон более долгих временных масштабов. Существование низкочастотного конца восходящего временного каскада энергии можно определить по переходу графика спектра к нулевому или даже положительному наклону. Детальные расчеты временных энергетических спектров, представленные, например, в [7], указывают, что в тропиках восходящий каскад четко ограничен периодом 45 дней. У внетропической погоды такого четкого ограничения нет, ибо наклон уменьшается до нуля очень плавно в масштабах от месяца до нескольких сезонов. Во всяком случае, можно считать, что восходящий каскад энергии не проникает в междугодовые масштабы. Из этого следует, что парадигма Лоренца не применима к междугодовым и, может быть, даже к сезонным атмосферным вариациям.

Разумеется, в климатических (междугодовых и еще более долгих) временных масштабах существуют свои источники неустойчивости атмосферных движений, которые могут порождать свои восходящие каскады энергии. Например, это может быть каскад, порождаемый неустойчивым откликом климатической системы Земли на годовой ход притока тепла от Солнца. В связи с этим были важны многочисленные исследования, которые показали, что графики временных энергетических спектров междугодовых климатических вариаций являются негладкими.

В диапазоне временных масштабов от года до примерно десяти лет были найдены многие пики спектральной плотности. Особенно четко эти пики видны в спектрах процессов Эль-Ниньо – Южного Колебания (ЭНЮК), развивающихся в тропиках Тихого океана. Происхождение этих пиков долгое время было предметом жарких дебатов. Многие исследователи считали, что эти пики, будучи найденными по довольно коротким рядам инструментальных метеорологических наблюдений, явля-

ются незначимыми со статистической точки зрения, то есть они возникают «по воле случая» и при более длительных наблюдениях исчезнут.

Были и те, кто признавал реальность пиков и связывал их с некоторыми процессами в атмосфере, возбуждаемыми внешними силами. Среди этих исследователей надо упомянуть Н.С. Сидоренкова, считающего, что в возникновении пиков в спектрах процессов ЭНЮК повинны неравномерности вращения Земли [8]. Сходного мнения уже довольно давно придерживались отдельные зарубежные ученые.

В работе [9] точка зрения Сидоренкова была подвергнута проверке на доступных сейчас тщательно выверенных рядах инструментальных метеорологических наблюдений и их, так называемых, ре-анализах, то есть рядах наблюдений, пропуски и внутренние несогласованности которых были исключены с помощью современных гидродинамических моделей циркуляции атмосферы и океана. В результате все основные пики спектральной плотности в диапазоне временных масштабов от года до примерно десятилетия были соотнесены с тремя внешними периодическими воздействиями на климатическую систему: чандлеровским колебанием полюсов Земли; лунно-солнечной нутацией оси вращения Земли; циклом солнечной активности. Главные периоды этих воздействий составляют приблизительно 1.2, 18.6 и 11.5 года, соответственно. Они несоизмеримы друг с другом и воздействуют на климатическую систему как бы невпопад и вместо хаоса порождают очень сложные, кажущиеся случайными, но, на самом деле, предсказуемые вариации, среди которых наиболее известны «ритмы» ЭНЮК.

Коль скоро вышеуказанные периоды действительно несоизмеримы, уместно проверить гипотезу, что математическим образом короткопериодных вариаций климата является странный нехаотический аттрактор (СНА), обнаруженный математиками в конце XX века в решениях простых нелинейных динамических систем, возбуждаемых двумя внешними силами, периоды которых «очень несоизмеримы» (обычно находятся в соотношении так называемого «золотого сечения» $(\sqrt{5} - 1)/2$). Гипотеза СНА привлекательна тем, что допускает предсказание будущего поведения рассматриваемой динамической системы без каких-либо ограничений, по крайней мере, в принципе.

Анализ, выполненный в [9] (см. также [10, 11]), показал, что пики в спектрах ЭНЮК и даже в спектрах некоторых метеорологических процессов, развивающихся во внетропических широтах Земли, действительно имеют свойство, присущее спектрам СНА-динамики. Это свойство состоит в том, что величины логарифмов амплитуд пиков связаны линейной зависимостью с величинами логарифмов порядковых номеров этих пиков.

Цель настоящей работы – продемонстрировать, что, благодаря СНА-характеру межгодовых климатических вариаций, Эль-Ниньо может быть предсказано с заблаговременностью более года. Это превосходит пределы предсказуемости всех ныне существующих методов прогнозов Эль-Ниньо.

2. Общепланетарная синфазность междугодовых атмосферных ритмов

Основанием для возможности неограниченного предсказания Эль-Ниньо является то, что процессы ЭНЮК не являются изолированным региональным явлением. В [11] было доказано, что ЭНЮК есть часть некоторого общепланетарного про-

цесса, названного по этой причине Глобальной Атмосферной Осцилляцией (ГАО). Пространственная структура ГАО была определена как средняя разность в среднемесячных полях давления на уровне моря и приповерхностной температуры, имеющая место при событиях Эль-Ниньо и противоположных им событиях Ла-Нинья. Для поля давления на уровне моря эта структура показана на рис. 1. Она определяется наличием двух очень больших по площади областей разностей давления одного и того же знака.

Во-первых, это – Х-образная структура с перекрестьем, приходящимся на канонический район возникновения Эль-Ниньо на востоке приэкваториальной полосы Тихого океана. Внутри этой структуры разность давления является отрицательной. Это значит, что при Эль-Ниньо приземное давление внутри этой области ниже, чем при Ла-Нинья. Четыре ветви отходят от перекрестья в направлениях Берингового пролива и далее на северо-восток Азии, в сторону Новой Зеландии, далее на юг Индийского океана, в сторону юга Северной Америки и далее в Северную Атлантику, и, наконец, в сторону юга Южной Америки и далее в Южную Атлантику. Во-вторых, это область, имеющая форму эллипса, внутри которой разность давления является положительной. Она охватывает западную часть Тихого океана, Австралию, большую часть Индийского океана, и приэкваториальные части Африки и Атлантического океана.

Надо подчеркнуть, что обе описанные области довольно симметрично расположены относительно экватора. И это – несмотря на весьма различную конфигура-

Рис. 1. Глобальная карта, показывающая пространственную структуру Глобальной Атмосферной Осцилляции (ГАО) в сглаженном среднемесячном поле приземного давления (гПа) по данным анализа инструментальных метеорологических наблюдений HadSLP2 за период с 1920 по 2016 гг. Символы * указывают географические районы, значения давления в которых используются, чтобы рассчитать индексы ГАО1 и ГАО2 (исключая район на экваторе у западных берегов Центральной Америки и район к западу от Индонезии). Значки ♦ указывают такие районы, используемые для расчета индекса ГАО3

Fig. 1. The global map showing the spatial structure of the Global Atmospheric Oscillation (GAO) in the monthly mean field of the sea-level pressure (SLP, hPa) according to an analysis of instrumental meteorological observations HadSLP2 from 1920 for 2016. Symbols * specify geographical areas, values of SLP in which are used to calculate the GAO1 and GAO2 indices (excepting an area on the equator near the west coast of Central America, and an area to the west from Indonesia). Symbols ♦ specify such areas used to calculate the GAO3 index.

цию континентов в северном и южном полушариях, что должно было бы приводить к различной географической локализации крупномасштабных особенностей метеорологических полей. Наличие симметрии указывает, что есть нечто более существенное, чем топография земной поверхности. Можно предположить, что это – общие для обоих полушарий внешние воздействия на климатическую систему. Например, три ранее указанные периодичности (чандлеровское колебание полюсов Земли и другие).

ГАО можно охарактеризовать всего одним числом – индексом ГАО1, который вычисляется как сумма нормированных значений давления на уровне моря в десяти географических районах, совпадающих с экстремумами (максимумами и минимумами) в поле ГАО. Задание этих десяти значений позволяет весьма хорошо охарактеризовать обе вышеописанные области в поле ГАО. Центры районов указаны на рис. 1 звездочками: $GAO1 = P(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 35^{\circ} - 25^{\circ}W) + P(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 55^{\circ} - 65^{\circ}E) + P(55^{\circ} - 65^{\circ}N, 95^{\circ} - 85^{\circ}W) + P(65^{\circ} - 55^{\circ}S, 95^{\circ} - 85^{\circ}W) + P(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 145^{\circ} - 155^{\circ}E) - P(45^{\circ} - 55^{\circ}N, 175^{\circ} - 165^{\circ}W) - P(45^{\circ} - 55^{\circ}N, 15^{\circ} - 5^{\circ}W) - P(55^{\circ} - 45^{\circ}S, 15^{\circ} - 5^{\circ}W) - P(55^{\circ} - 45^{\circ}S, 175^{\circ} - 165^{\circ}W) - P(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 95^{\circ} - 85^{\circ}W)$. При Эль-Ниньо этот индекс является положительным, а при Ла-Нинья – отрицательным.

Среди выбранных районов есть два, которые приходятся на канонические районы развития процессов ЭНЮК. Это – районы с координатами $(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 145^{\circ} - 155^{\circ}E)$ и $(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 95^{\circ} - 85^{\circ}W)$. Значения давления на уровне моря в этих районах сильно различаются при Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Поэтому может показаться, что именно они определяют значение индекса ГАО1. Если бы это имело место в реальности, то ГАО было бы не более чем индексом ЭНЮК, отличным от ранее предложенных индексов.

Действительно, если подсчитать индекс процессов ЭНЮК (будем называть его Расширенным Океаническим Ниньо Индексом – РОНИ или Extended Oceanic Niño Index – EONI) как среднюю приповерхностную температуру в приэкваториальной полосе Тихого океана $(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 170^{\circ} - 80^{\circ}W)$, то кросскорреляция между временными вариациями индексов ГАО1 и РОНИ оказывается максимальной при нулевом фазовом сдвиге между этими вариациями, то есть вариации происходят синхронно во времени. Величина этой максимальной кросскорреляции для межгодовых вариаций очень велика (примерно 0.9). Учитывая, что исходные метеорологические данные, использованные в ре-анализе NOAA CIRES 20th Century Global Reanalysis Version 2c, по которому считалась эта кросскорреляция, отягощены ошибками наблюдений, уменьшающими всякую возможную связь между рассматриваемыми индексами, можно заключить, что между процессами ГАО и ЭНЮК на межгодовых периодах фактически имеется взаимно однозначная (функциональная) связь. Помимо указанного ре-анализа, были исследованы данные наблюдений Met Office Hadley Center HadSLP2 и HadCRUT.4.6, которые продемонстрировали аналогичный результат.

Чтобы убедиться, что процессы ГАО и ЭНЮК не являются тождественными, определим еще один индекс ГАО, обозначаемый далее, как ГАО2. Этот индекс отличается от ГАО1 тем, что при его подсчете районы с координатами $(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 145^{\circ} - 155^{\circ}E)$ и $(5^{\circ}S - 5^{\circ}N, 95^{\circ} - 85^{\circ}E)$, соответствующими каноническому району развития Южного колебания, исключаются из рассмотрения. Синхронная кросскорреляция между индексом ГАО2 и РОНИ тоже оказывается очень велика (примерно 0.8), хотя и меньше, чем между ГАО1 и РОНИ.

Рис. 2. Ряды РОНИ и ГАО2, подсчитанные по данным метеорологических наблюдений HadCRUT и HadSLP2 за период 1920–2014 гг., и картины вещественных компонент их вейвлетных преобразований. Области положительных значений вещественных компонент закрашены оттенками серого цвета. Области отрицательных значений оставлены белыми

Fig. 2. Time series of EONI and GAO2 according to meteorological observations HadCRUT and HadSLP2 during 1920–2014 and patterns of the real components of the wavelet transforms of these series. Areas of positive values of real components are painted over by shades of the gray color. Areas of negative values are left white

Вейвлетное преобразование (ВП) рядов РОНИ и ГАО2 позволяет выяснить, вариации каких временных масштабов определяют эту большую кросскорреляцию. Сами ряды и картины вещественных компонент ВП обоих рядов показаны на рис. 2. Даже простое визуальное сопоставление этих картин позволяет увидеть, что сходство между рядами в расположении областей, где вещественная компонента ВП или положительна или отрицательна, имеет место только в относительно малых временных масштабах (менее примерно 8 лет). В масштабах более 16 лет схождения, как кажется, совсем нет. Заметим, что отсутствие схождения в больших масштабах может быть следствием того, что рассматриваемые временные ряды имеют конечную длину. В результате при ВП этих рядов возникают краевые искажения, которые тем существеннее, чем больше масштаб ВП. Конечно, чтобы уменьшить краевые искажения, ряды были во-первых, предварительно центрированы и нормированы, и во-вторых, дополнены с обоих краев «буферами», то есть искусственными рядами постоянных значений РОНИ и ГАО2 длиной по 50 лет. Постоянные значения при этом были определены по средним 50-летним отрезкам в началах и концах фактических рядов. Тем не менее полного исключения краевых искажений все это не гарантирует.

Чтобы оценить степень схождения картин ВП в относительно малых масштабах с большими деталями, удобно рассмотреть картину кросскорреляции ВП рядов ГАО2 и РОНИ, показанную на рис. 3. Как она вычисляется, описано в Приложении.

Из рис. 3 видно, что во временных масштабах менее 8 лет серые области, которые соответствуют синфазным вариациям ГАО2 и РОНИ, покрывают почти всю эту картину. При этом большинство соседних областей, закрашенных серым цветом, разделяются жирной черной линией. Это указывает на то, что в этих масштабах существует практически полное совпадение фаз вариаций ГАО2 и РОНИ. Имеющиеся очень небольшие по площади белые области в этих масштабах, скорее всего, надо отнести на счет ошибок метеорологических наблюдений. Эти области наиболее заметны в 1930–1940-е годы, когда, из-за мировой войны, количество и качество наблюдений заметно уменьшалось.

Серые области преобладают также в масштабах от 8 до 16 лет. А вот в масштабах более 16 лет, особенно в средней части картины, то есть в 1930–1970-е годы, преобладают уже белые области. В масштабах более 32 лет доминирование белых областей существует уже все время (с 1880 по 2012 год). При этом вблизи масштаба 64 года в 1880–1950-е годы существуют только белые области, разделенные жирными линиями. Это, возможно, свидетельствует о противофазности вариаций этого масштаба в сравниваемых рядах, хотя вышеуказанное наличие краевых искажений ВП не позволяет говорить об этом с полной определенностью. По причине краевых искажений являются сомнительными также довольно значительные положительные и отрицательные кросскорреляции в масштабах около 64 лет, о которых будет говориться далее. Впрочем, большие временные масштабы не очень важны с точки зрения разработки метода предсказаний Эль-Ниньо, что является целью данной работы.

Справа от картины локальных (относящихся к конкретному календарному году) вейвлетных кросскорреляций на рис. 3 показан график кросскорреляций, рассчитанный путем осреднения всех локальных кросскорреляций для каждого временного масштаба, рассматриваемого по отдельности. Видно, что средние кросскорреляции

Рис. 3. Ряды ГАО2 и РОНИ и картина локальных кросскорреляций их вещественных преобразований, показанных на рис. 2. Области положительных кросскорреляций закрашены оттенками серого цвета. Области отрицательных значений оставлены белыми. Границы между областями, на которых вещественная компонента вейвлетного преобразования ряда ГАО2 меняет свой знак, показаны жирными черными линиями. Границы между областями, на которых меняется знак вещественной компоненты ряда РОНИ, показаны тонкими черными линиями. Справа от картины показан график средней кросскорреляции между колебаниями рядов ГАО2 и РОНИ в зависимости от вейвлетного временного масштаба

Fig. 3. Time series of GAO2 and EONI and patterns of local crosscorrelations of the real components of their wavelet transforms shown in fig. 2. Areas of positive local crosscorrelation values are painted by shades of the gray color. Areas the of the negative values are left white. Boundaries between the areas on which the real component of wavelet transform of the GAO2 series changes its sign are shown by fat black lines. Boundaries between the areas on which the sign in the EONI series changes are shown by thin black lines. To the right of the pattern, temporal mean crosscorrelations between variations in the GAO2 and EONI series are shown for each wavelet scale taken separately

очень велики (превышают 0.5) для диапазона масштабов от года до 16 лет, достигая 0.9 для масштабов от примерно 3.5 до 5.6 года. Как упоминалось ранее, на этот диапазон приходятся самые главные пики в энергетических спектрах ГАО и ЭНЮК, относимые к субгармоникам чандлеровского колебания полюсов Земли и супергармонике цикла пятен на Солнце.

В еще одном временном масштабе, соответствующем супергармонике 1:2 лунно-солнечной нутации в 9.3 года, средняя кросскорреляция превышает 0.8. Средняя кросскорреляция остается довольно большой (около 0.5) в масштабах 16–18 лет, хотя спектры в этих масштабах уже не показывают какого-либо пика спектральной плотности. Эти масштабы соответствуют главному периоду лунно-солнечной нутации (18.6 года), который слишком велик, чтобы оценка его спектральной плотности по рядам длиной лишь порядка 100 лет могла быть удовлетворительной. Однако значительные в среднем кросскорреляции на этом периоде, вероятно, реальны. Хотя бы потому, что два самых мощных Эль-Ниньо за всю историю инструментальных

метеорологических наблюдений (1997/98 и 2015/16 годов) разделены как раз этим периодом.

В еще больших временных масштабах средние кросскорреляции резко уменьшаются, становясь иногда даже отрицательными. Конечно, осреднение вейвлетных кросскорреляций в этих масштабах крайне ненадежно, ибо на всем интервале наблюдений укладывается менее десятка вариаций таких масштабов. Но, во всяком случае, видимые в этих масштабах большие области локальных кросскорреляций, как уже упомянуто выше, почти все являются белыми, то есть соответствуют противофазности сравниваемых вариаций ГАО2 и РОНИ. Из всего сказанного можно заключить, что динамика внетропических компонент ГАО и РОНИ (ЭНЮК) отнюдь не тождественна. Между этими процессами существует очень большое сходство в диапазоне временных масштабов примерно от года до десятилетия, но поведение ГАО и РОНИ (ЭНЮК) в масштабах нескольких десятилетий является совершенно различным.

До настоящего времени было принято истолковывать наличие тесных кросскорреляций между различными индексами ЭНЮК и индексами внетропических атмосферных процессов так, что ЭНЮК считались причиной, а внетропические процессы – следствиями. Однако еще много лет назад А.Н. Колмогоров предупреждал о неправомерности истолкования кросскорреляционных связей между различными временными рядами в терминах причин и следствий. В последующем проблема фазовой синхронизации совокупностей нелинейных осцилляторов рассматривалась многими исследователями. Укажем на книгу Блехмана [12], на сравнительно недавно опубликованную за рубежом книгу [13], а также на недавнюю публикацию в журнале SCIENCE [14], в которой даются отличные иллюстрации тех трудностей, с которыми приходится сталкиваться при исследовании причинно-следственных связей в нелинейных системах.

При рассмотрении проблемы взаимосвязи между процессами ЭНЮК и внетропическими процессами в глобальной климатической системе естественно предположить, что имеет место вынужденная фазовая синхронизация, когда обе подсистемы находятся под воздействием одних и тех же периодических внешних сил. Такая синхронизация отличается от часто рассматриваемой внутренней синхронизации нелинейных осцилляторов, связанных друг с другом (известный эффект Гюйгенса). Конечно, процессы ЭНЮК как-то взаимодействуют с внетропическими процессами. Однако эти взаимодействия до сих пор очень плохо изучены. Вероятно, они проявляют себя через целые цепочки взаимодействий. Например, влияние Эль-Ниньо на процессы в Северной Атлантике или, наоборот, влияние Северной Атлантики на Эль-Ниньо не может быть непосредственным.

3. Предсказуемость Эль-Ниньо

Как уже говорилось выше, одним из важных внешних воздействий на климатическую систему, вероятно, является чандлеровское колебание полюсов Земли. Как было установлено еще во второй половине XX века [15, 16], это колебание возбуждает в атмосфере и океанах приливные волны, распространяющиеся с запада на восток противофазно во внетропических широтах обоих полушарий. Эти волны называются «полюсными приливами». Недавно, путем анализа данных спутнико-

Рис. 4. То же самое, что на рис. 3, но для рядов ГАО3 и РОНИ. Причем вейвлетное преобразование вещественной компоненты ряда ГАО3 смещено на 14 месяцев вперед

Fig. 4. The same is shown that in fig. 3, but for the GAO3 and EONI series. The pattern of the real component of the GAO3 wavelet transform is displaced for 14 months ahead

вой альтиметрии водной поверхности Тихого океана, было показано [17], что волна северо-тихоокеанского полюсного прилива, после отражения от западных берегов Северной Америки, возбуждает в приэкваториальной полосе Тихого океана теплое поверхностное течение. Это – как раз положительные аномалии температуры при Эль-Ниньо, которое является составным элементом ЭНЮК.

Что касается полюсных приливов в атмосфере, они тоже распространяются с запада на восток, но континенты не являются для них непреодолимым препятствием. Поэтому можно ожидать, что в динамике ГАО тоже будет наблюдаться западно-восточное смещение. При рассмотрении временных изменений пространственной структуры ГАО в полях давления на уровне моря такое смещение действительно было найдено. Оказалось, что, в процессе этого смещения, обе ранее упомянутые пространственные области в поле ГАО смещаются с запада на восток и переходят друг в друга, то есть Х-образная область после перемещения над континентом Америки и Атлантикой становится эллиптической, а эллиптическая область после смещения ее центра на запад Тихого океана становится Х-образной. Оба перехода происходят примерно за 14 месяцев до наступления следующего события Эль-Ниньо. Общую структуру поля ГАО в это время можно характеризовать одним числом – еще одним индексом ГАО, который назовем ГАО3. ГАО3 вычисляется как сумма нормированных значений среднемесячного приземного давления в 7 географических районах: $GAO3 = P(50^{\circ}N - 70^{\circ}N, 170^{\circ}E - 120^{\circ}W) + P(70^{\circ}S - 50^{\circ}S, 170^{\circ}E - 120^{\circ}W) +$

$+P(60^{\circ}\text{S} - 20^{\circ}\text{N}, 40^{\circ}\text{E} - 80^{\circ}\text{E}) + P(30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{W}) - P(0^{\circ} - 40^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{W}) - P(45^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{S}, 120^{\circ}\text{E} - 60^{\circ}\text{W}) - P(50^{\circ}\text{N} - 70^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{E} - 90^{\circ}\text{E})$.
 Центры всех семи районов показаны на рис. 1 ромбиками.

Был построен временной ряд значений индекса ГАОЗ. Этот ряд показан в верхней части рис. 4 вместе с рядом РОНИ. Оба ряда центрированы и нормированы. Можно видеть, что основные экстремумы ряда ГАОЗ опережают экстремумы ряда РОНИ примерно на год. Так что, как кажется, ГАОЗ можно использовать для предсказания РОНИ, то есть того, будет ли наблюдаться Эль-Ниньо или Ла-Нинья с примерно годичной заблаговременностью.

Чтобы оценить эту возможность более определенно, были вычислены кросс-корреляции между показанными рядами в разных временных масштабах и при различных временных сдвигах между этими рядами. Для этого была использована техника кросс-корреляций вейвлетных преобразований двух рядов, описанная в Приложении. Картина локальных вейвлетных кросс-корреляций, то есть соотношений между вариациями в этих рядах в каждом вейвлетном (временном) масштабе и для каждого календарного года, показана на рис. 4. Ряд ГАОЗ при этом уже сдвинут вперед по времени на 14 месяцев. Справа от этой картины показаны средние этих локальных вейвлетных кросс-корреляций для всех временных масштабов по отдельности.

Видно, что в верхней половине картины, начиная с временного масштаба 2 года и до масштаба между 16 и 32 годами, преобладают области, закрашенные оттенками серого цвета. Средние локальных кросс-корреляций в этих масштабах превышают 0.5 (за исключением временного масштаба около 8 лет).

Так что, зависимости между упреждающими вариациями ГАОЗ и следующими за ними вариациями РОНИ в этих масштабах не очень сильно уступают таким же зависимостям между синхронными вариациями ГАОЗ и РОНИ, показанным на рис. 3. Поэтому их можно использовать в целях прогноза. Заметим, что современные прогнозы Эль-Ниньо/Ла-Нинья имеют кросс-корреляцию с фактами на уровне 0.5 лишь при заблаговременности порядка половины года, а не 14 месяцев, как в случае использования ГАОЗ. В масштабах, превышающих главный период лунно-солнечной нутации (18.6 года), связи между сдвинутым вперед ГАОЗ и РОНИ становятся, в целом, несинхронными. Так что их уже нельзя использовать в прогностических целях.

Легче рассматривать картины синхронных и упреждающих кросс-корреляций между ВП рядов ГАОЗ и РОНИ так, как они показаны на рис. 5 для календарных лет 1960–2014. В эти годы метеорологические наблюдения были наиболее полными и точными по сравнению с предыдущим периодом наблюдений. На рис. 5, вверху рисунка снова показаны отрезки исходных рядов ГАОЗ и РОНИ. По ним хорошо видно, что практически все максимумы и минимумы РОНИ запаздывают по сравнению с максимумами и минимумами ГАОЗ на год, а иногда даже более.

Верхняя из показанных на рис. 5 картин локальных вейвлетных кросс-корреляций между рядами ГАОЗ и РОНИ соответствует нулевому временному сдвигу между сопоставляемыми рядами, средняя картина соответствует временному сдвигу ряда ГАОЗ вперед на 14 месяцев, как и на картине кросс-корреляций между ВП полных рядов ГАОЗ и РОНИ, показанной на рис. 4, а нижняя картина – временному сдвигу в целых 38 месяцев. При построении этой последней картины знак ВП сдвинутого ряда ГАОЗ был изменен на обратный.

Укрупнение картин на рис. 5 по сравнению с картиной на рис. 4 позволяет

Рис. 5. То же, что на рис. 4, но только для интервала календарных лет 1960–2014 гг. при отсутствии временного сдвига ряда ГАОЗ (верхняя картина), при сдвиге в 14 месяцев (средняя картина) и при сдвиге в 38 месяцев и смене знака вещественной компоненты ВП ряда ГАОЗ (нижняя картина)

Fig. 5. The same is shown that in fig. 4, but only for an interval of calendar years 1960–2014 in the absence of temporary displacement of a row GAO3 (the top pattern), at the displacement of 14 months (an average pattern) and at the displacement of 38 months, and the signs of the real component pattern of the GAO3 wavelet transform are changed to the opposite signs (the lower pattern)

ясно видеть, что, в диапазонах масштабов от 4 лет до примерно 5.7 года и от 8 до 16 лет, практически после всех жирных черных линий (напомним, они обозначают моменты смены знака вещественной компоненты ВП ряда ГАОЗ) располагаются белые области. Сопоставляя эти белые области с графиками рядов ГАОЗ и РОНИ, можно усмотреть, что они соответствуют периодам времени, когда величина ГАОЗ уже начала уменьшаться, а величина РОНИ все еще росла. Эти белые области занимают примерно половину расстояния (в календарных годах) до следующей жирной черной линии. Вторые половины этих расстояний отделены от первых половин тонкими черными линиями. Это значит, что в моменты времени, соответствующие этим тонким линиям менялся знак вещественной компоненты ВП ряда РОНИ, а знак ряда ГАОЗ оставался неизменным, так что в эти периоды времени величины обеих вещественных компонент рядов ГАОЗ и РОНИ одновременно уменьшались.

Обращаясь теперь к картине кросскорреляций ВП рядов ГАОЗ и РОНИ, показанной для временного сдвига в 14 месяцев, видим качественное изменение в том, что в обеих вышеуказанных областях временных масштабов существуют только серые области, отделенные друг от друга жирными черными линиями. Это означает, что вариации вещественных компонент обоих рядов в этих масштабах были полностью синфазными. Иначе говоря, прогнозы величин вещественной компоненты ряда РОНИ по величинам такой компоненты ряда ГАОЗ, взятым на 14 месяцев ранее, были бы вполне успешными. В том числе, по графикам рядов ГАОЗ и РОНИ, показанным вверху рис. 5, и соответствующему участку картины ВП для сдвига ряда ГАОЗ на 14 месяцев можно видеть, что предсказание сильнейшего Эль-Ниньо 1997 года было бы успешным. Единственным исключением является диапазон календарных лет 1970–1980 гг., когда на картине видны белые области. Так что соответствующие прогнозы были бы малоуспешными.

После того как данная статья была подготовлена, произошло новое мощное Эль-Ниньо в 2015 году. Все существующие сейчас прогностические схемы дали ложную тревогу о начале этого Эль-Ниньо еще в 2014 году и только потом откорректировали свои предсказания с малой заблаговременностью. Дополнительный же расчет индекса ГАОЗ показал, что Эль-Ниньо 2015/16 вполне могло быть предсказано с заблаговременностью в 14 месяцев, хотя мощность его, конечно, была бы при этом занижена, как это свойственно всем прогностическим схемам, основанным на линейной регрессии.

Обратимся, наконец, к рассмотрению картины локальных кросскорреляций ВП рядов ГАОЗ и РОНИ, подсчитанных для временного сдвига в 38 месяцев. Можно видеть, что в диапазоне временных масштабов от более чем в 2.8 до 5.7 года резко преобладают серые области, разделенные жирными черными линиями. Хотя во многих случаях можно увидеть полоски белого цвета (они особенно узки в интервале 1970–2007 календарных лет), можно говорить, что вариации этих масштабов в ряду РОНИ действительно могут быть довольно хорошо предсказаны по вариациям в ряду ГАОЗ с заблаговременностью в 38 месяцев при обращении знака этих последних вариаций.

Зато в диапазоне временных масштабов от 8 до 16 лет в рассматриваемой картине преобладают белые области, оконтуренные слева жирными черными линиями и затем переходящие (через тонкие черные линии) в серые области. Это свидетельствует о том, что предсказания с заблаговременностью в 38 месяцев для данного диапазона временных масштабов затруднены.

Заключение

Подвергнута ревизии общепринятая парадигма об ограниченной предсказуемости вариаций погоды и климата. Для этого использовано представление о странной нехаотичности короткопериодных вариаций климата, ранее полученное с помощью анализа временных энергетических спектров рядов метеорологических наблюдений.

В качестве главной моды короткопериодных климатических вариаций использована недавно выявленная так называемая Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО), которая включает в себя, как составную часть, процессы Эль-Ниньо – Южного Колебания (ЭНЮК). Определены индексы, характеризующие ГАО и ЭНЮК, среди которых имеется индекс ГАОЗ, временные изменения которого предваряют временные изменения индекса РОНИ, характеризующего процессы ЭНЮК.

С использованием специально разработанной техники анализа кросс-корреляций между временными рядами выявлены диапазоны масштабов, внутри которых существует тесная связь между временными вариациями упреждающего индекса ГАОЗ и индекса РОНИ. Это – междугодовые – декадные временные масштабы, в которых, как было показано ранее, глобальная климатическая система форсируется несколькими внешними силами, периоды которых, по-видимому, несоизмеримы друг с другом. Помимо годового хода притока тепла от Солнца, эти силы включают чандлеровское колебание полюсов Земли, лунно-солнечную нутацию и цикл солнечной активности. В результате оказывается возможным предсказывать индекс РОНИ, характеризующий ЭНЮК, с заблаговременностью в 14 месяцев, что существенно превышает заблаговременность существующих сейчас прогнозов ЭНЮК. Указано также на возможность дальнейшего увеличения заблаговременности до нескольких лет.

Приложение

Кросскорреляция пар временных рядов по их вейвлетным преобразованиям

Вейвлетное преобразование (ВП)

$$WT_b(a) = a^{-1/2} \sum_{t=t_1}^{t=t_n} X(t)G(t - b/a) \quad (1)$$

является популярной техникой для изучения многомасштабных вариаций во временных рядах. В (1) $X(t)$, $t = t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ является преобразуемым рядом, $b = t_1, t_2, \dots, t_n$ – временные сдвиги этого ряда, $a = a_1, a_2, \dots, a_m$ – вейвлетные временные масштабы, а $G(t - b/a)$ – вейвлетная функция. Выходным продуктом ВП является картина величин $WT_b(a)$ на части полуплоскости (b, a) , ограниченной временными рамками преобразуемого ряда и диапазоном рассматриваемых временных масштабов.

Одной из наиболее часто используемых вейвлетных функций является функция Морле

$$G(t) = \pi^{-0.25} \exp(-t^2/2) \exp(iCt), \quad C > 5. \quad (2)$$

В данной работе использовано значение $C = 6.2035$, при котором масштаб a точно соответствует обычному временному масштабу. С помощью функции Морле удобно изучать волноподобные вариации во временных рядах, поскольку помимо картины величин вещественной $\text{Re } WT_b(a)$ и мнимой $\text{Im } WT_b(a)$ компонент $WT_b(a)$ в качестве выходного продукта можно использовать амплитуду $\text{Am } WT_b(a) = \sqrt{(\text{Re } WT_b(a))^2 + (\text{Im } WT_b(a))^2}$ и фазу $\text{Ph } WT_b(a) = \tan^{-1}(\text{Im } WT_b(a)/\text{Re } WT_b(a))$.

ВП отличается от спектрального анализа Фурье тем, что оно в равной степени применимо для анализа стационарных и нестационарных временных рядов. Однако вариант ВП, аналогичный взаимному спектральному анализу, не существовал. Только недавно в [18–20] для этой цели было предложено вычислять произведение вещественных компонент двух рассматриваемых рядов

$$\text{Cross } WT_b(a) = \text{Re } WT_{1b}(a) \cdot \text{Re } WT_{2b}(a) \quad (3)$$

Это произведение является как бы локальной (по времени и по вейвлетному масштабу) кросскорреляцией сравниваемых рядов. Области на картине всех таких произведений, внутри которых произведения являются положительными, закрашиваются оттенками серого, пропорционально величине произведения. Области, внутри которых произведения отрицательны, оставляются белыми. Граница между серой и белой областями помечается жирной черной линией, если при росте времени (слева направо на картине) переход между областями в рассматриваемом временном масштабе происходит за счет смены знака ВП первого ряда, то есть вариации этого ряда в рассматриваемом временном масштабе опережают соответствующие вариации второго ряда. Такая граница помечается тонкой черной линией, если первыми идут вариации второго ряда. Аналогично, жирная линия на границе между белой и серой областями свидетельствует о лидировании вариаций второго ряда, а тонкая линия – о лидировании первого ряда. Жирная линия на границе между двумя соседними серыми областями говорит о полной фазовой синхронизации вариаций рассматриваемых рядов, а тонкая линия на границе между соседними белыми областями – об их противофазности.

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

Библиографический список

1. Кибель И.А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. М.: Гостехиздат, 1957. 375 с.
2. Richardson L.F. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1922. 236 p.
3. Charney J. On the scale of atmospheric processes // Geofys. Publ. 1948. Vol. 17. P. 1–17.
4. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atmos.Sci., 1963. Vol. 20. P. 130–141.
5. Блинова Е. Н. Динамика атмосферных движений планетарного масштаба и гидродинамический долгосрочный прогноз погоды. М.: Гидрометеиздат, 1976. 78 с.

6. Saltzman B., Teweles S. Further statistics on the exchange of kinetic energy between harmonic components of the atmospheric flow // *Tellus*. 1964. Vol. 16. P. 432–435.
7. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 1. Хаотические вариации погоды // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2017. Т. 25. № 4. С. 4–22.
8. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб: Гидрометеоиздат, 2002. 200 с.
9. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-Ниньо – Южного Колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое // *Фундаментальная и Прикладная Климатология*. 2017. Т. 2. С. 144–155.
10. Серых И.В., Сонечкин Д.М. О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо – Южного Колебания // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 472. № 6. С. 716–719.
11. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли глобальной атмосферной осцилляции // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.
12. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
13. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 496 p.
14. Sugihara G., May R., Ye H., Hsieh C.-H., Deyle E., Fogarty M., Munch S. Detecting causality in complex systems // *Science*. 2012. Vol. 338. P. 496–500.
15. Максимов И.В. Полюсный прилив в морях и атмосфере Земли // *Труды института океанологии АН СССР*. 1955. № 8. С. 92–118.
16. Bryson R.A., Starr T.B. Chandler tides in the atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1975. Vol. 34. P. 1975–1986.
17. 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.
18. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. О соотношениях лидирования–запаздывания между атмосферными трендами температуры и концентрации углекислого газа в период плейстоцена // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 467. № 6. С. 709–712.
19. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Парренин Ф., Сонечкин Д.М. Исследование разномасштабных взаимосвязей между изменениями приземной температуры воздуха и концентрации CO₂ в атмосфере // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 4. С. 533–544.
20. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. О связи антропогенного роста концентрации углекислого газа в атмосфере и современного потепления // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 477. № 1. С. 87–91.

References

1. Kibel I.F. *Vvedenie v Gidrodinamicheskie Metodi Kratkosrochnogo Prognoza Pogodi*. M.: Gostechizdat, 1957. 375 s. (in Russian).
2. Richardson L.F. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1922. 236 p.

3. Charney J. On the scale of atmospheric processes. *Geofys. Publ.*, 1948, vol. 17, pp. 1–17.
4. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos.Sci.*, 1963, vol. 20, pp. 130–141.
5. Blinova E.N. Dinamika Atmosferykh Dvizeniy Planetarnogo Masshtaba i Gidrodinamicheskoy Dolgosrochniy Prognoz Pogodi. M.: Gidrometeoizdat., 1976. 78 s. (in Russian).
6. Saltzman B., Teweles S. Further statistics on the exchange of kinetic energy between harmonic components of the atmospheric flow. *Tellus*, 1964, vol. 16, pp. 432–435.
7. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 1. Chaotic weather variations. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 25, iss. 4, pp. 4–22. DOI:10. 18500/0869-6632-2017-25-4-4-22.
8. Sidorenkov N.S. Atmosferykhie Protsessi i Vraschenie Zemli. StPb.: Gidrometeoizdat, 2002. 200 s. (in Russian).
9. Serykh I.V., Sonechkin D.M. An Intercomparison of temporal power spectra of the El Niño – Southern Oscillation indices and of the global temperature and pressure fields in the surface layer. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2017, vol. 2, s. 144–155 (in Russian).
10. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Manifestations of motions of the Earth's pole in the El Niño – Southern Oscillation Rhythms. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, no. 2, pp. 256–259.
11. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Y.A., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 165–171.
12. Blekhman I.I. Sinchronizatsiya Dinamicheskikh System. M.: Nauka, 1971. 896 s. (in Russian).
13. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 496 p.
14. Sugihara G., May R., Ye H., Hsieh C.-H., Deyle E., Fogarty M., Munch S. Detecting causality in complex systems. *Science*, 2012, vol. 338, pp. 496–500.
15. Maximov I.V. Poljussnyy priliv v moriach i atmosfere Zemli. *Trudy instituta okeanologii AN USSR*, 1955, no. 8, s. 92–118 (in Russian).
16. Bryson R.A., Starr T.B. Chandler tides in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1975, vol. 34, pp. 1975–1986.
17. 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).
18. Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. Lead-lag relationships between atmospheric trends of temperature and carbon dioxide concentrations during the Pliocene. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 467, part 2, pp. 423–426.
19. Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Parrenin F., Sonechkin D.M. A study of different scale relationship between changes of the surface air temperature and the CO₂ concentration in the atmosphere. *Ice and Snow*, 2016, vol. 56(4), pp. 533–544.
20. Vakulenko N.V., Kotlyakov V.M., Sonechkin D.M. The connection between the growth of anthropogenic carbon dioxide in the atmosphere and the current climate warming. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 477, part 1, pp. 1307–1310.

Вакуленко Надежда Викторовна – родилась в Москве (1955), окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана, факультет Приборостроение (1978). С 1993 года работает в Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук. Защитила в ИО РАН диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2004) в области исследований климата с помощью вейвлетного преобразования. С 1999 по 2007 год работала под руководством академика Мони́на А.С., занимаясь математической обработкой научных исследований. Опубликовала около 30 научных статей.

117997 Москва, Нахимовский проспект д. 36
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
E-mail: vanaval39@yandex.ru

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 РАН. 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 д. 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