ХАОС И ПОРЯДОК В АТМОСФЕРНОЙ ДИНАМИКЕ

Часть 1. Хаотические вариации погоды

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
E-mail: iserykh@ocean.ru, dsonech@ocean.ru

Поступила в редакцию 19.05.2017

В связи с проблемой сосуществования хаоса и порядка в динамике погоды и климата уточняются представления о временных энергетических спектрах крупномасштабных атмосферных движений в диапазоне масштабов от суток до года. Для внетропических широт это спектры индексов Блиновой среднего и сдвигового по вертикали зонального движения. Для тропиков это спектры модифицированных индексов Южного колебания и Эль-Ниньо. В отличие от ранее имевшихся представлений у индексов Блиновой найдено, что переходы между частями спектров, имеющими разные средние наклоны, происходят плавно, так что нет «синоптического максимума» спектральной плотности на периоде порядка недели и «цикла индекса» на периодах двух-трех недель. Это подтверждает хаотичность вариаций погоды внетропических широт. У спектров тропических индексов найден излом в ходе спектральной плотности на периоде около 5 дней, ранее замеченный лишь в спектрах некоторых локальных характеристик тропической погоды. В спектре модифицированного индекса Южного колебания найден второй излом на периоде около 45 дней, ранее известный лишь для колебания Маддена-Джулиана. Эти изломы указывают на существование элементов «порядка» в динамике тропической погоды, которая, в целом, тоже хаотична. Спектры месячных – сезонных вариаций погоды на всей Земле найдены слагающимися из кажущегося непрерывным основанием и наложенных на него дельта-пику, так что в этом диапазоне масштабов динамика является смешанной (отчасти хаотической и отчасти упорядоченной).

Ключевые слова: Временные энергетические спектры погоды и ее сезонных изменений, хаос и порядок в вариациях погоды.

DOI:10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22

Образец цитирования: Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 1. Хаотические вариации погоды // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 4. С. 4–22. DOI:10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22

CHAOS AND ORDER IN ATMOSPHERIC DYNAMICS

Part 1. Chaotic weather variations

I. V. Serykh¹, 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

Ideas of temporary energy distributions of large-scale atmospheric motions are made more accurately in the range of scales from days to one year in order to solve the problem of the chaos and order co-existence in the weather and climate dynamics. Spectra of the Blinova's mean and shifted zonal extratropical flow indices as well as spectra of the tropical Southern Oscillation and El Niño indices are used for this purpose. Unlike earlier had ideas, it is found for the Blinova indices that transitions between the parts of the spectrum ranges having different average inclinations happen smoothly so there is no «synoptic maximum» of the spectral density near the period about one week and no «index cycle maximum» near the period of about two-three weeks. It confirms a chaoticity of the extratropical weather variations. As for the tropical indices, a break of the spectral density curve is found at the period of 5 days, which has been earlier noticed only in the dynamics of some local characteristics of tropical weather. The second break is found at the period of about 45 days for the modified index of the Southern Oscillation where a peak in the spectrum of the Madden–Julian Oscillation has been earlier found. These breaks indicate the existence of an «order» in the tropical weather dynamics, which also is chaotic, in general. Spectra of the monthly and seasonal weather variations everywhere on the Earth are found composed from a seemingly continuous background and some delta peaks imposed on this background. As a result, the dynamics consists of a mix of partly chaotic and partly ordered weather variations.

Keywords: Temporal power spectra of weather and its seasonal variations, chaos and order in the weather variations.

DOI:10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22

Paper reference: 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. Issue 4. P. 4–22. DOI:10.18500/0869-6632-2017-25-4-4-22.

Введение

С начала второй половины 20 века исследования динамики атмосферы и океана существенно стимулировались развитием вычислительной техники. Это привело к разработке численных методов краткосрочных и среднесрочных прогнозов погоды. В 2003 году Всемирная метеорологическая организация (ВМО) запустила десятилетнюю программу THORPEX (The Observing-System Research and Predictability Experiment), целью которой было увеличить заблаговременность надежных прогнозов погоды до двух недель. Для этого были предприняты большие усилия по совершенствованию прогностических моделей не только в вычислительном, но и в физическом отношении. Однако поставленная цель не была полностью достигнута. Для

приземной температуры воздуха предел полезной предсказуемости у самых лучших моделей, таких как модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), составляет сейчас не более недели. Количественные прогнозы осадков исчерпывают свою полезность еще быстрее.

Полученный результат не является неожиданным, ибо усилиями ряда метеорологов-теоретиков, прежде всего Е.Н. Лоренца, еще в середине 20 века была развита теория предсказуемости (точнее, непредсказуемости) погоды. Эта теория указала на неточность начальных данных о состоянии атмосферы в сочетании с неустойчивостью погодообразующих атмосферных процессов к малым возмущениям, как на непреодолимое препятствие для прогнозов погоды увеличенной заблаговременности. Первоначально Лоренцем было оценено [1], что предельно достижимой при численном интегрировании детализованных прогностических моделей гидротермодинамики атмосферы является месячная заблаговременность. В последующие годы эта оценка была даже немного уменьшена [2, 3], поскольку рост ошибок прогноза у вновь разработанных более детализованных моделей оказался быстрее, чем у модели, рассматривавшейся Лоренцем. К тому же, ансамблевые прогнозы, на которые вначале возлагались большие надежды, показали прогрессирующее заглаживание предвычисляемых метеорологических полей после примерно десятого дня. По мнению Л. Бенгтссона [4] практически достигнутая к настоящему времени заблаговременность надежных прогнозов уже не на много уступает теоретически возможной заблаговременности, если использовать традиционную систему прогностических уравнений гидротермодинамики атмосферы. Однако, это совсем не означает, что нет других возможностей. Это активно обсуждается в приложениях математики к наукам о Земле (см., например, работу [5]).

Отсутствие очевидных путей для дальнейшего увеличения заблаговременности полезных прогнозов погоды явилось одной из причин того, что Всемирная метеорологическая организация с конца 20 века сосредоточилась на проблеме изменения современного климата. Для решения этой проблемы было предложено использовать те же самые модели, что и для прогнозов погоды. Конечно, эти модели требовалось дополнить учетом взаимодействия атмосферы с океаном и явно описать в них все известные к настоящему времени внешние воздействия на тепловой баланс климатической системы.

Этот подход привел к концепции унифицированного (unified) или так называемого бесшовного (seamless) предсказания [6, 7]. В рамках этой концепции каждое отдельное изменение состояния климатической системы считается ограниченно предсказуемым. Таким образом, эта концепция считает ограниченно предсказуемыми (хаотическими) и погоду и короткопериодные колебания климата. Но у климатических изменений гораздо больше предел предсказуемости за счет так называемой «предсказуемости второго рода», определяемой медленно меняющимися внешними воздействиями на климатическую систему.

На самом деле сейчас есть только практические, но не строгие теоретические, доказательства хаотичности изменений погоды. Доказательств же хаотичности изменений климата вообще нет. Действительно, современная теория динамических систем указывает на положительность одной или нескольких ляпуновских экспонент, которые количественно описывают неустойчивость атмосферных процессов к малым возмущениям, как на необходимое условие существования детерминирован-

ного «хаоса» [8]. Другим признаком такого «хаоса» является нецелая размерность аттрактора рассматриваемой динамики. К сожалению, проверка выполнения этих условий возможна только для «игрушечных» атмосферных моделей. Поэтому остается ориентироваться на достаточное условие «хаоса», состоящее в непрерывности энергетических спектров атмосферных процессов.

Динамика реальной атмосферы (и ее численных гидротермодинамических моделей) характеризуется двумя видами энергетических спектров: пространственными и временными. Пространственные спектры атмосферных движений заведомо дискретны из-за финитности размеров атмосферы по горизонтали. Расчеты таких спектров начали выполнять еще с начала второй половины 20 века. Примеры можно найти в [9, 10], а ранний обзор этих работ содержится в [11]. Обычно оценивалась спектральная плотность кинетической и доступной потенциальной энергий как функций зонального волнового числа. Были найдены два диапазона этих волновых чисел, в которых наклоны спектров в двойном логарифмическом масштабе приближенно следовали законам « -3 » и « $-5/3$ ».

Подобные законы были ранее выведены для однородной и изотропной двумерной турбулентности из простых анализов размерностей, а затем подтверждены как преимущественно наблюдающиеся при численных экспериментах с моделями квазидвумерных течений, в том числе атмосферных и океанических, а также найдены во многих натурных измерениях турбулентных течений [12–14]. Надо, впрочем, заметить, что численные модели тех лет, например, пионерский эксперимент Д.К. Лилли [15], были выполнены на очень маломощных (с позиций сегодняшнего дня) вычислительных машинах. Рассматривавшиеся в них сеточные области были очень невелики, так что краевые условия не могли не влиять на результаты расчетов. Этого не допускают предположения об однородности и изотропии, лежащие в основе теории турбулентности. Важно также, что времена интегрирования моделей были очень небольшими, и, по существу, все полученные результаты относятся к некоторым переходным процессам, возникавшим в моделях от случайных начальных условий. С этих позиций представляется, что было бы полезно произвести подобные численные моделирования заново на нынешней вычислительной технике и с учетом обоих отмеченных недостатков.

Гораздо реже исследовались зависимости энергии атмосферных колебаний как функции двумерного волнового числа. К тому же все опубликованные до настоящего времени расчеты такого рода были выполнены на очень небольших выборках исходных метеорологических данных. Как пример, упомянем единственный отечественный расчет двумерного спектра амплитуд волн в поле геопотенциала поверхности 500 гПа (hPa) северного полушария в [16]. Согласно этой работе, наиболее велики амплитуды у тех волн, у которых разности между меридиональными и зональными волновыми числами равны четырем. Эти амплитуды уменьшаются при переходе от ультрадлинных волн к синоптическим волнам.

Поскольку сделать заключение о хаотичности или нехаотичности планетарной динамики атмосферы по пространственным энергетическим спектрам невозможно, приходится обратиться к рассмотрению временных энергетических спектров, которые, в принципе, могут быть или дискретными, или непрерывными. При этом можно все же принимать во внимание вышеупомянутые результаты теории квазидвумерной (и, более конкретно, геострофической) турбулентности о зависимостях

плотности спектральной энергии от пространственных волновых чисел, если руководствоваться известной гипотезой Тейлора о «замороженной» турбулентности [17]. Соответствующие рассуждения для геофизических потоков имеются, например, в работах [12, 13, 18].

Целью настоящей работы, состоящей из двух частей, являлось проверить, выполняется ли условие хаотичности (непрерывность временного энергетического спектра) отдельно для изменений погоды (данная первая часть работы) и отдельно для изменений климата (вторая часть работы). Было найдено, что погода хаотична, а климат нет. Это обесценивает концепцию предсказаний погоды и климата с помощью одной и той же модели в пользу концепции предсказаний погоды и климата с помощью разных моделей.

1. Энергетические спектры внетропических вариаций погоды

Оценки временных энергетических спектров индексов Блиновой для геопотенциала поверхности 500 hPa северного полушария вычислялись многими исследователями, работавшими в начале второй половины 20 века. Однако исходные данные радиозондовых измерений высот геопотенциала, которые были доступны из оперативных анализов прогностических метеорологических центров того времени, существовали всего за один-два десятка лет и были несовершенны. Одна из самых последних таких оценок была сделана в работе [20] путем преобразования Фурье различных отрезков ряда ежедневных значений H_{500} за 1949–1983 годы с последующим суммированием результатов всех преобразований.

На практике всякая оценка временного энергетического спектра получается не непрерывной, а дискретной, так как она подсчитывается по временному архиву конечной длины на конечном числе частот. Но полученный спектр может выглядеть непрерывным, если спектральная плотность для всех рассматриваемых частот заметно отличается от нуля. Именно так и оказалось при оценке спектра в [20]. Это, казалось бы, давало положительный ответ на вопрос о непрерывности временного энергетического спектра индекса Блиновой, если бы не изломы в ходе спектральной плотности, видимые в этой оценке. На периодах от 2-х до примерно 10 дней средний наклон кажущегося непрерывным спектра примерно следовал закону « -3 », а на более долгих периодах, от 10 до примерно 45 дней, он следовал закону « $-5/3$ ». Излом на стыке этих наклонов, как казалось, подтверждал предположение о существовании так называемого «синоптического максимума», где энергия вводится в атмосферу за счет разрешения бароклинной неустойчивости циклонических волн. Активным пропагандистом этой точки зрения в нашей стране был А.С. Монин [19].

Заметим, что в теории геострофической турбулентности, которая обычно оперирует не с временными, а с пространственными спектрами атмосферных движений, считается, что наклон « -3 » соответствует прямому (к большим волновым числам) каскадному переносу энтропии, впервые описанному Я. Огурой [21]. Наклон же « $-5/3$ » соответствует обратному (к малым волновым числам) переносу энергии. Однако при условии принятия гипотезы о «замороженной» турбулентности Дж. Тейлора [17] такой обратный перенос считается наблюдаемым и в атмосферных временных спектрах. Физически этот перенос соответствует так называемой «отрицательной вязкости» [18], при которой энергия синоптических образований (циклонов

и антициклонов) передается более крупным объектам, таким как «блокирующие» антициклоны и стационарные области пониженного атмосферного давления. Практика метеорологов-прогнозистов подтверждает это предположение. На ежедневных синоптических картах можно видеть, как возникшие по соседству циклонические волны укрупняются и объединяются в более крупные и долгоживущие области пониженного атмосферного давления. При этом гребни повышенного давления, первоначально существовавшие между циклоническими волнами, вытесняются на границы возникающих областей пониженного давления, формируя обширные антициклоны, которые «блокируют» западно-восточный перенос в умеренных широтах и очень важны для среднесрочных предсказаний погоды.

Возвращаясь к оценке спектра индекса Блиновой в работе [20], отметим, что видный в ней излом в ходе спектральной плотности на периоде около 5 дней хорошо соответствует представлению о существовании специфического масштаба, в котором энергия вводится в атмосферную динамику за счет разрешения бароклинной неустойчивости циклонов. В спектрах, полученных при численных экспериментах, на этом масштабе всегда был виден излом или даже пик спектральной плотности на периоде около недели и на волновых числах 5–8 синоптических волн. Поэтому многие исследователи общей циркуляции атмосферы (ОЦА) второй половины 20 века предполагали, что в спектрах ОЦА существует так называемый «синоптический максимум».

Многие исследователи также предполагали, что в реальной атмосфере имеет место характерное время чередования «блокирующих» антициклонов и преимущественно зональной циркуляции в умеренных широтах – так называемый цикл индекса зональной циркуляции [22]. С этим циклом связывали наличие другого пика спектральной плотности на периоде около двух-трех недель [23]. Добавим, что известна работа [24], в которой было заявлено о наличии пика на периоде в 45 дней в спектре углового момента атмосферы – характеристики, сильно коррелированной с индексом зональной циркуляции. В спектре [20] этот гипотетический пик виден как излом спектральной плотности на периоде около 40–50 дней, то есть вблизи периода супергармоники 1:8 годового хода.

На периодах более сезона в оценке спектра [20] имело место «спектральное плато», то есть наклон становился почти нулевым, как это, по-видимому, впервые, было обнаружено в спектре вариаций средней полушарной температуры воздуха в работе [25]. На это плато были наложены мощные пики годового и полугодового периодов, а также излом спектральной плотности вблизи четвертьгодового периода. О существовании полугодового пика знали еще Блинова и ее сотрудники, объяснившие существование этого пика в рамках линейной модели общей циркуляции бароклинной атмосферы [26, 27]. Конечно, сейчас легко критиковать эти работы, ибо известно, что никакая линейная система не способна продуцировать пики на супергармониках воздействующей на эту систему периодической внешней силы. Для этого в системе обязательно должна присутствовать нелинейность. Тогда эти гармоники появляются, если отклик нелинейной системы на воздействующую периодичность становится неустойчивым. На это было указано уже в [20].

В данной работе были выполнены новые расчеты энергетического спектра индекса Блиновой по ежедневным данным современных ре-анализов, в которых усвоение данных наблюдений выполняется с использованием моделей общей циркуляции

атмосферы (ОЦА). С одной стороны, использование моделей существенно облегчило анализ метеорологических полей в районах с редкой сетью наблюдений. Но, с другой стороны, оно, возможно, повлекло некоторые искажения реальной атмосферной динамики, которые почти невозможно идентифицировать. Расчеты по данным всех ре-анализов делались с помощью многократного быстрого преобразования Фурье (темные линии на рисунках), а также через предварительный расчет временной корреляционной функции в диапазоне временных сдвигов от нуля до 10 лет (светлые линии на рисунках).

Сначала был использован ре-анализ NCEP/NCAR. Однако оказалось, что в нем имеются существенные неточности. Так, в спектре индекса Блинной, рассчитанном по ре-анализу NCEP/NCAR для уровня 500 hPa южного полушария, годовой пик вообще отсутствовал, хотя для слоя 300–700 hPa этот пик имел место. Поверить в такое трудно. Затем были использованы другие ре-анализы (ERA-20C, ERA-INTERIM, NOAA CIRES 20th Century Reanalysis). Все они привели к практически одинаковым оценкам временного энергетического спектра индекса Блинной для обоих полушарий. Поэтому в данной статье эти оценки проиллюстрированы только для американского ре-анализа «20 век» (20th Century Reanalysis) за 1871–2012 годы [28]. В этом ре-анализе модель ОЦА используется для усвоения данных атмосферного давления на уровне моря, а в качестве граничных условий используются ежемесячные данные о температуре поверхности океана и распределении морского льда.

На рис. 1 (вверху) показаны оценки временного энергетического спектра индекса Блинной для уровня 500 hPa северного полушария, которые подтверждают общий характер этого спектра, описанный выше по работе [20], но с отличиями, существенными для заключения о непрерывности этого спектра. Прежде всего, не видно никаких следов «синоптического максимума» спектральной плотности, то есть переход от наклона « -3 » к наклону « $-5/3$ » происходит плавно. Далее, не видно максимумов на периодах супергармоник 1:4 и 1:8, а наклон « $-5/3$ » плавно трансформируется в «спектральное плато». Это, как кажется, исключает предположение работы [24] о существовании 45-дневного пика, ограничивающего диапазон «отрицательной вязкости» со стороны больших периодов. Возможно, что этот диапазон продолжается вплоть до пика на полугодовом периоде, который является главным пиком в спектрах индекса Блинной для южного полушария (рис. 2, вверху).

Здесь надо упомянуть, что, в отличие от пиков спектральной плотности, для значимости/незначимости которых предложено проверять нулевую гипотезу «красного шума», не существует никаких тестов для проверки статистической значимости изломов в ходе спектральной плотности. При заключении об их реальности приходится руководствоваться исключительно косвенными признаками. Таким признаком может служить указание, полученное еще много лет назад в работах известного американского метеоролога Б. Зальцмана и его сотрудников [29, 30]. Они показали, что у реальной атмосферы нет никакого единственного масштаба, локализованного в пространстве волновых чисел, где энергия вводится в ОЦА. На самом деле есть один, довольно широкий, диапазон зональных волновых чисел от 5 до 11, куда поступает энергия при разрешении бароклинной неустойчивости циклонов, а также другой (зональное волновое число 2), куда поступает энергия от разрешения неустойчивости, возникающей у западно-восточного переноса умеренных широт из-за конфигурации континентов и океанов. В результате оба эти диапазона являются источниками

энергии для ОЦА. Кроме того, обмены энергией между возмущениями ОЦА, отвечающими различным зональным волновым числам, не являются локальными по масштабу. Так, энергия приходит к длинноволновым возмущениям западно-восточного переноса, соответствующим зональным волновым числам 3 и 4, от всех возмущений синоптического масштаба, хотя наибольший вклад дают те, которые имеют волновые числа 6–8. Эти же синоптические возмущения дают наибольший вклад в увеличение энергии зонального течения. Трудно ожидать, что при отсутствии одного выделенного масштаба, в котором энергия вводится в атмосферу, появятся какие-то пики или изломы в спектрах индексов ОЦА.

Указанные работы Зальцмана и его сотрудников использовали девятилетний архив всех имевшихся в то время сетевых радиозондовых наблюдений. Это нема-

Рис. 1. Энергетические спектры индекса зональной циркуляции Блиновой северного полушария для уровня 500 гПа (вверху) и для толщины слоя 300–700 гПа (внизу), рассчитанные по ежедневным данным ре-анализа «20-й век» за 1871–2012 гг.

Fig. 1. Power spectra of the Blinova's zonal circulation indices for the 500 hPa level (upper), and the 300–700 hPa layer (below) for the Northern Hemisphere calculated on the base of the daily «20th century» re-analyses (1871–2012)

ло даже с современных позиций, так что полученные на их основе выводы о перераспределении кинетической энергии атмосферных движений кажутся правдоподобными. Однако их правдоподобие дополнительно увеличивается при теоретическом рассмотрении спектральной формы уравнений динамики атмосферы, которая представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения метеорологических полей (функции тока и др.) по сферическим гармоникам. Квадратично нелинейные члены этих уравнений, например, баротропного уравнения вихря, описывают взаимодействия какой-то компоненты зонального потока с двумя какими-то волнами, или взаимодействия каких-то трех волн [31]. Для того чтобы вклад такого члена в динамику был ненулевым, линейные комбинации троек волновых чисел, соответствующих рассматриваемой зональной компоненте и двум волнам (соответствующих трем волнам) удовлетворяли некоторым правилам, называемым «правилами отбора» [32]. Из этих правил следует, что для эффективного взаимодействия, по крайней мере, два набора волновых чисел должны быть разнесены по спектру волновых чисел. В том числе, по крайней мере, два зональных волновых числа не должны быть соседними. Иными словами, «правила отбора» обя-

Рис. 2. То же самое, что на рис. 1, но для южного полушария
Fig. 2. The same that is shown in Fig. 1, but for the Southern Hemisphere

зывают перераспределение энергии по спектру волновых чисел быть нелокальным. Именно это и получил Зальцман с сотрудниками. Заметим, что о такой нелокальности упоминается в самом недавнем отечественном обзоре работ по квазидвумерной турбулентности [14].

Тем самым, характер перераспределения энергии в системе ОЦА отличен от такового, предполагавшегося в теоретических работах по геострофической турбулентности. Тем более удивительно, что при этом законы « -3 » и « $-5/3$ », обоснованные только для локальных нелинейных взаимодействий, наблюдаются при расчете энергетических спектров реальных атмосферных движений.

Спектр индекса Блиновой, рассчитанный для слоя относительной топографии 300–700 hPa северного полушария (рис. 1, внизу), содержит пик на периоде в одну треть года, хотя мощность его примерно на порядок уступает мощности полугодового пика. В спектрах же для южного полушария (рис. 2) пики на периоде в одну треть года четко выражены и для уровня 500 hPa и для слоя 300–700 hPa. Они не уступают по мощности соответствующим пикам на годовом периоде. В итоге, можно предположить, что наиболее высокочастотный из всех перечисленных пиков (на периоде в треть года) в спектрах ограничивает диапазон «отрицательной вязкости» со стороны низких частот.

Повторим, что наиболее мощным в южном полушарии является полугодовой пик. Это вполне объяснимо, если принять высказанное выше положение о том, что супергармоники годового периода возникают из-за неустойчивости отклика атмосферы на годовой ход притока тепла от солнца. Сейчас перигелий имеет место летом, а апогелий – зимой южного полушария. В результате амплитуда годового хода инсоляции в южном полушарии больше, чем в северном. Это более мощное периодическое форсирование может сильнее дестабилизировать динамику атмосферы, что и приводит к появлению мощного пика на полугодовом периоде.

Положение низкочастотного края диапазона «отрицательной вязкости» является крайне важным с точки зрения теории предсказуемости. Если прогностическая модель достаточно совершенна, в ней должно существовать такое же укрупнение ошибок прогнозов, которое существует для реальных погодных колебаний. Из-за ограничения диапазона «отрицательной вязкости» со стороны больших периодов, ошибки прогноза не должны, в среднем, попадать в еще более долгие временные масштабы. Поэтому в рамках парадигмы предсказуемости (непредсказуемости) Лоренца объяснить безуспешность современных сезонных прогнозов погоды невозможно. Истинную причину этого надо искать в отсутствии надлежащей параметризации вариаций собственно погоды и недостаточно хорошем моделировании физики сезонных ее изменений. Это приводит к мысли об уместности специальных моделей для сезонных предсказаний погоды.

2. Энергетические спектры вариаций погоды в тропиках

Погода в тропиках разительно отличается от погоды умеренных широт, как по ее субъективному восприятию, так и по ее установленным физическим закономерностям. В умеренных широтах вариации погоды определяются частой сменой циклонов и антициклонов – образований так называемого синоптического (размерами во многие сотни и немногие тысячи километров) масштаба. В тропиках же циклоны (тропические ураганы) представляют собой сравнительно редкие и более

мелкомасштабные явления, а обычный режим погоды определяют образования локального и мезомасштаба (размерами от нескольких километров до многих десятков километров). Поэтому физика гидрометеорологических явлений в умеренных и внутритропических широтах является различной.

Наиболее известными гидрометеорологическими процессами в тропическом поясе Земли являются те, которые объединяются под названием Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). В соответствии с задачей данной работы уместно рассмотреть энергетические спектры этих процессов, как они представлены экваториальным индексом южного колебания (Equatorial Southern Oscillation Index – ESOI) и расширенным океаническим индексом (Extended Oceanic Nino Index – EONI). Первый индекс характеризует атмосферную компоненту процессов ЭНЮК. Он рассчитывается как разность приземного давления на уровне моря между Индонезией (5°N – 5°S , 90°E – 140°E) и экваториальным Тихим океаном (5°N – 5°S , 80°W – 130°W). Второй индекс характеризует океаническую компоненту ЭНЮК, и рассчитывается по температуре поверхности океана, осредненной в регионе (5°N – 5°S , 80°W – 170°W). Поскольку в ре-анализе «20 век» не содержатся данные по температуре поверхности океана, EONI рассчитывался по средней температуре приповерхностного воздуха.

Отметим, что энергетические спектры индексов ЭНЮК в диапазоне масштабов менее года никогда не анализировались и даже не рассчитывались. Спектры ESOI и EONI, рассчитанные в диапазоне от двух до тысячи дней, показаны на рис. 3. Они похожи на спектры индексов Блиновой в том, что имеют кажущееся непрерывным основание. Так что эти спектры говорят о хаотичности динамики тропической погоды. Средние наклоны этих спектров следуют закону « $-5/3$ » в широком диапазоне масштабов. Поэтому возможно, что у динамики тропической погоды также существует «отрицательная вязкость», при которой относительно мелкомасштабные возмущения укрупняются. У индекса EONI (рис. 3, внизу) диапазон « $-5/3$ » простирается от пяти дней до четверти года (на периоде около девяноста дней можно усмотреть небольшой излом) или даже до полугода. Однако точное положение низкочастотного края диапазона « $-5/3$ » установить нельзя, как это было отмечено и для спектров индекса Блиновой.

На высокочастотном крае (около пяти дней) в спектре EONI виден аналог «синоптического максимума». Правее этого максимума имеется участок, где наклон спектра следует закону минус третьей степени. Основное отличие спектра EONI от спектров индекса Блиновой в том, что в первом практически нет диапазона нулевого наклона. Его наличие можно подозревать только для участка от четверти до трети года. В еще большем масштабе вместо «спектрального плато» имеет место даже более крутое, чем в диапазоне « $-5/3$ », увеличение спектральной плотности вплоть до пика годового периода и далее. Более подробное обсуждение этого наклона будет дано во второй части настоящей работы.

Спектр индекса ESOI (рис. 3, верху) отличается от спектров индекса Блиновой гораздо существеннее. Диапазон « $-5/3$ » у него явно ограничен со стороны низких частот изломом на периоде в 45 дней. Напомним, что такое положение низкочастотного края каскада «отрицательной вязкости» предполагалось в оценке спектра индекса Блиновой в [20], но явно отсутствует в показанных на рис. 1 и 2 новых оценках. 45-дневный максимум спектральной плотности хорошо известен у характеристик тропической погоды. Возможно, впервые этот максимум был обнаружен

Р.А. Мадденом и П.Р. Джулианом [33] при изучении временной эволюции мезомасштабных очагов конвекции над акваториями Индийского и запада Тихого океанов. С тех пор эта эволюция называется их именами: Madden–Julian oscillation (MJO). Колебание Маддена–Джулиана сейчас активно изучается как один из возможных предвестников Эль-Ниньо, с одной стороны, и как результат аккумуляции многообразных погодных колебаний в тропиках, с другой стороны (см., например, [34, 35]). Однако до сих пор не обращалось внимание на совпадение пика в спектре МЖО с низкочастотным краем обратного каскада энергии погодных колебаний и, одновременно, с супергармоникой 1:8 годового периода. Это двойное совпадение важно, ибо

Рис. 3. Энергетические спектры экваториального индекса Южного колебания (вверху), то есть разницы среднего атмосферного давления на уровне моря между Индонезией (5°N – 5°S , 90°E – 140°E) и экваториальным Тихим океаном (5°N – 5°S , 80°W – 130°W), и индекса расширенного океанического индекса Эль-Ниньо (внизу), то есть средней температуры приповерхностного воздуха в регионе (5°N – 5°S , 80°W – 170°W), рассчитанные по данным ре-анализа «20-й век» за 1871–2012 годы

Fig. 3 Power spectra of the Equatorial Southern Oscillation index (upper), i.e. the difference between the mean sea-level pressure over the Indonesia archipelago (5°N – 5°S , 90°E – 140°E) and the equatorial part of the Pacific ocean (5°N – 5°S , 80°W – 130°W), and the extended oceanic El Niño index (below), i.e. the mean near-surface air temperature over the region (5°N – 5°S , 80°W – 170°W) calculated on the base of daily «20th century» re-analyses (1871–2012)

оно говорит о том, что вариации состояния атмосферы в тропиках с периодами более 45 дней имеют иное происхождение по сравнению с более короткопериодными вариациями.

Возвращаясь к спектру ESOI, надо добавить, что на периодах более 45 дней спектральная плотность заметно убывает вплоть до полугодового периода. При этом на непрерывное основание спектра наложены довольно явные пики супергармоник 1:4 и 1:3 годового периода. Плотность снова возрастает на периодах, еще более долгих, чем половина года, как это имеет место и у спектра EONI. Возможно, что в спектре ESOI имеется также излом на супергармонике 1:6. Однако истолковывать его и пики 1:4, 1:3 как результаты разрешения неустойчивости реакции атмосферы на годовой ход притока тепла от Солнца в данном случае не стоит, ибо соответствующие пики видны в спектре приходящей к Земле солнечной радиации (см. fig. 2 в работе [36]). Проще их истолковать как результаты простого линейного отклика тропической атмосферы на инсоляционное внешнее воздействие.

На высокочастотном конце диапазона масштабов « $-5/3$ » в спектре ESOI имеет место выпуклый вниз излом спектральной плотности (локальный минимум). Далее спектральная плотность увеличивается, а не уменьшается, вплоть до периода в 5 дней. Надо сказать, что Мадден и Джулиан указали на существование пятидневной волны в конвективной активности тропиков уже в своей первой публикации. Спектр ESOI на рис. 3 показывает, что на самом деле это не есть волна фиксированного 5-дневного периода, ибо максимум вблизи этого периода является не пиком, а изломом, выпуклым вверх. Так что в реальности должен существовать целый пакет волн с близкими к пяти дням периодами.

В сторону периодов короче 5 дней плотность в спектре ESOI резко убывает, следуя закону минус четвертой степени. Такой закон был описан П.Г. Сафменом для полей двумерной турбулентности, в которых происходит концентрация завихренности в тонких пограничных слоях между крупными вихрями [37]. Однако А.С. Монин и А.М. Яглом (см. раздел 26.3. в книге [12]) в свое время усомнились, что такая концентрация возможна в реальности. Тем не менее, именно такого рода концентрация очагов конвективной активности в тропиках была обнаружена Мадденом и Джулианом. Насколько нам известно, ранее на наличие закона « -4 » в высокочастотных частях спектров индексов ЭНЮК не было указано никем из метеорологов.

Заключение и выводы

- На основе данных современных ре-анализов метеорологических наблюдений, оценены энергетические спектры нескольких индексов общей циркуляции атмосферы в диапазоне временных масштабов от двух до тысячи дней. Полученные спектры характеризуют вариации погоды внетропических и тропических широт. Они получены по несравненно большему количеству исходных данных, чем все ранее опубликованные оценки.
- Спектры суточных, месячных и сезонных вариаций погоды вне тропиков являются сплошными и, более того, гладкими, то есть они не содержат не только спектральных пиков, но даже изломов в ходе спектральной плотности. Это подтверждает хаотичность и, следовательно, ограниченную по времени предсказуемость этих изменений внетропической погоды.

- Для изменений внетропической погоды ото дня ко дню средние наклоны всех четырех оцененных спектров (для индексов Блиновой среднего и сдвигового по вертикали течения в умеренных широтах обоих полушарий) найдены равными минус трем. Для изменений с периодами более недели и до одного-двух месяцев – равными минус пяти третям. Это соответствует наклонам, выведенным в теории геострофической турбулентности, несмотря на то, что наложенные в этой теории условия однородности, изотропии и локальности нелинейных взаимодействий движений разных масштабов не выполняются для реальной атмосферы. Части всех спектров в диапазоне периодов от одного-двух месяцев до года имеют кажущееся непрерывным основание с нулевым наклоном, на которое наложены пики супергармоник годового периода 1:2 и 1:3, причем супергармоника 1:2 для южного полушария является даже более мощной, чем сама годовая гармоника. Это указывает на наличие некоторого внутреннего «порядка» в сезонных изменениях внетропической погоды, которые, в целом, все же являются хаотичными.
- На примерах специально определенных индексов Эль-Ниньо – Южного колебания – оценены спектры высокочастотных вариаций тропической погоды. Эти спектры также найдены сплошными. Высокочастотная часть одного из них имеет средний наклон минус третьей степени, как и у спектров внетропической погоды. Высокочастотная часть другого спектра имеет средний наклон минус четвертой степени, что не было получено ни в одном из ранее выполненных исследований тропической погоды. Средние наклоны частей обоих спектров в диапазоне масштабов от примерно пяти и вплоть до примерно сорока пяти дней равны минус пяти третям. В диапазоне сезонных изменений характер этих спектров является смешанным (отчасти хаотичным, отчасти упорядоченным), так как на непрерывные основания с нулевым (или даже положительным) наклоном там наложены пики многочисленных супергармоник годового периода, вплоть до супергармоники 1:8 (период около 45 дней).
- Части тропических спектров с разными средними наклонами отделены друг от друга изломами в ходе спектральной плотности. Видны изломы на периодах в пять и сорок пять дней, которые ранее было выявлены только для некоторых локальных характеристик тропической погоды, таких как колебание Маддена–Джулиана.

Подводя итоги данного исследования, важно подчеркнуть, что низкочастотный край обратного переноса энергии, существующий, судя по имеющимся эмпирическим данным, в реальной атмосфере, служит барьером для распространения быстрых погодных изменений в более долгие временные масштабы как вне, так и внутри тропиков. При этом происходит расщепление связей между собственно погодой и ее сезонными изменениями. Если прогнозы составляются путем интегрирования детализованных моделей гидротермодинамики атмосферы, реалистически воспроизводящих энергетические спектры вариаций погоды, то такой же барьер должен быть свойственен укрупнению ошибок прогнозов погоды. Поэтому применение к сезонным предсказаниям парадигмы хаотичности Лоренца, суть которой состоит в неизбежном укрупнении ошибок прогноза по мере увеличения заблаговременности, кажется сомнительным.

По этой причине концепция «бесшовного предсказания» погоды и климата

с помощью одной и той же универсальной модели имеет мало шансов на успех. Взамен представляется перспективным разрабатывать специфические модели для разных масштабов движения, чтобы исключить из явного рассмотрения наибольшие неустойчивости атмосферных процессов, свойственные этим масштабам.

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

Библиографический список

1. Lorenz E.N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model // *Tellus*. 1982. Vol. 34. P. 505–513.
2. Bengtsson L., Hodges K.I. A note on atmospheric predictability // *Tellus A*. 2005. Vol. 58. No. 1. P. 154–157.
3. Bengtsson L., Hodges K.I., Froude L.S.R. Global observations and forecasting skill // *Tellus A*. 2005. Vol. 57. No. 4. P. 515–527.
4. Froude L.S.R., Bengtsson L., Hodges K.I. Atmospheric predictability revisited // *Tellus A*. 2013. Vol. 65i0, doi:10.3402/tellusa.v65i0.19022
5. Bunimovich L.A. Short- and long-term forecast for chaotic and random systems // *Nonlinearity*. 2014. Vol. 27. P. R51–R60.
6. Cullen M.J.P. The unified forecast/Climate model // *Meteorol. Magazine*. 1993. Vol. 122. P. 81–94.
7. Palmer T.N., Doblas-Reyes F.J., Weisheimer A., Rodwell M.J. Toward seamless prediction: calibration of climate change projections using seasonal forecasts // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2008. Vol. 89. No. 4. P. 459–470.
8. Арнольд В.И., Афраймович В.С., Ильяшенко Ю.С., Шильников Л.П. Теория бифуркаций // В книге: *Динамические системы–5, Итоги науки и техн. Сер. Современ. пробл. мат. Фундам. направления*, 5. М.: ВИНТИ. 1986. С. 5–218.
9. Eliassen E., Machenhauer B. On the observed large-scale atmospheric wave motions // *Tellus*. 1969. Vol. 21. P. 149–166.
10. Wiin-Nielsen A. On the annual variation and spectral distribution of atmospheric energy // *Tellus*. 1967. Vol. 19. P. 540–558.
11. Wiin-Nielsen A., Chen T.-C. *Fundamentals of Atmospheric Energetics*. New York: Oxford University Press, 1993. 376 p.
12. Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика*. 2-е изд., С-Пб.: Гидрометеиздат, 1996. Т. 2. 742 с.
13. Мирабель А.П., Монин А.С. Двумерная турбулентность // *Успехи Механики*. 1979. Т. 2. № 3. С. 47–95.
14. Данилов С.Д., Гурарий Д. Квазидвумерная турбулентность // *Успехи Физических Наук*. 2000. Т. 170. № 9. С. 947–968.
15. Lilli D.K. Numerical simulation of two-dimensional turbulence // *Phys. Fluids, Suppl. II*. 1969. Vol. 12. II-240 – II-249.

16. *Шановалова Н.С.* Статистические характеристики спектрального представления поля геопотенциала H500 для северного полушария // Труды Гидрометцентра СССР. 1987. Вып. 278. С. 90–99.
17. *Taylor G.I.* The spectrum of turbulence // Proc. R. Soc. London. Ser. A. Vol. 164. P. 476–490.
18. *Старр В.П.* Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 130 с.
19. *Монин А.С.* Гидродинамическая теория краткосрочных прогнозов погоды // Успехи Физических Наук. 1968. Т. 96. № 2. С. 327–367.
20. *Виноградская А.А., Власова И.Л., Даценко Н.М., Сонечкин Д.М.* Теория годового хода зональной циркуляции атмосферы. I. Шестимодовая модель супергармонических резонансов // Труды Гидрометцентра СССР. 1988. Вып. 297. С. 150–165.
21. *Ogura Y.* Energy transfer in a normally distributed and isotropic turbulent velocity field in two dimension // Physics Fluids. 1962. Vol. 5. No. 4. P. 395–401.
22. *Namias J.* The index cycle and its role in the general circulation // J. Meteorol. 1950. Vol. 8. P. 131–140.
23. *Webster P.J., Keller J.L.* Atmospheric variations: vacillation and index cycle // J. Atmos. Sci. 1975. Vol. 32. P. 1283–1300.
24. *Dickey J.O., Ghil M., Marcus S.L.* Extratropical aspects of the 40–50 day oscillation in length-of-day and atmospheric angular momentum // J. Geophys. Res.: Atmosphere. 1991. Vol. 96. No. D12. P. 22643–22658.
25. *Lovejoy S., Schertzer D.* Scale invariance in climatological temperatures and the spectral plateau // Annales Geophysicae. 1986. Vol. 4B. P. 401–410.
26. *Блинова Е.Н., Марчук Г.И.* К теории годового хода чисто зональной циркуляции // Труды ИФА АН СССР. 1958. № 2. С. 106–113.
27. *Марчук Г.И.* Годовой ход индекса циркуляции // Труды ИФА АН СССР. 1958. № 2. С. 114–118.
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. *Saltzman B., Fleisher A.* The exchange of kinetic energy between larger scales of atmospheric motions // Tellus. 1960. Vol. 12. P. 374–377.
30. *Saltzman B., Tewele S.* Further statistics on the exchange of kinetic energy between harmonic components of the atmospheric flow // Tellus. 1964. Vol. 16. P. 432–435.
31. *Silberman I.* Planetary waves in the atmosphere // J. Meteorol. 1954. Vol. 11. P. 27–34.
32. *Elsaesser H.W.* Evaluation of spectral versus grid methods of hemispheric numerical weather prediction // J. Appl. Meteorol. 1966. Vol. 5. P. 246–262.
33. *Madden R.A., Julian P.R.* Observations of the 40–50 day tropical oscillation – a review // Mon. Wea. Rev. 1994. Vol. 122. P. 814–837.
34. *Donald A., Meinke H., Power N., de Maia H.N., Wheeler M.C., White N., Stone R.C., Ribbe J.* Near-global impact of the Madden – Julian Oscillation on rainfall // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. L09704.
35. *Zhang C.* Madden – Julian Oscillation. Bringing weather and climate // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2013. Vol. 94. P. 1849–1870.

36. Huybers P., Curry W. Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability // *Nature*. 2006. Vol. 441. P. 329–332.
37. Saffman P.G. A note on the spectrum and decay of random two-dimensional vorticity distributions at large Reynolds number // *Studies in Applied Mathematics* // 1971. Vol. 50. No. 4. P. 377–383.

References

1. Lorenz E.N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*. 1982. Vol. 34. P. 505–513.
2. Bengtsson L., Hodges K.I. A note on atmospheric predictability. *Tellus A*. 2005. Vol. 58. No. 1. P. 154–157.
3. Bengtsson L., Hodges K.I., Froude L.S.R. Global observations and forecasting skill. *Tellus A*. 2005. Vol. 57. No. 4. P. 515–527.
4. Froude L.S.R., Bengtsson L., Hodges K.I. Atmospheric predictability revisited. *Tellus A*. 2013. Vol. 65i0, doi:10.3402/tellusa.v65i0.19022
5. Bunimovich L.A. Short- and long-term forecast for chaotic and random systems. *Nonlinearity*. 2014. Vol. 27. P. R51–R60.
6. Cullen, M.J.P. The Unified Forecast/Climate Model. *Meteorol. Magazine*. 1993. Vol. 122. P. 81–94.
7. Palmer T.N., Doblas-Reyes F.J., Weisheimer A., Rodwell M.J. Toward seamless prediction: calibration of climate change projections using seasonal forecasts. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2008. Vol. 89. No. 4. P. 459–470.
8. Arnold V.I., Afraimovich V.S., Ilyashenko Yu.S., Shilnikov L.P. Teoriya bifurkatsiy. V knige: Dinamicheskiye sistemy–5, Itogi Nauki i Tekhniki. Ser. Sovrem. probl. mat. fund. napr., 5, M.: VINITI. 1986. P. 5–218 (in Russian).
9. Eliassen E., Machenhauer B. On the observed large-scale atmospheric wave motions. *Tellus*. 1969. Vol. 21. P. 149–166.
10. Wiin-Nielsen A. On the annual variation and spectral distribution of atmospheric energy. *Tellus*. 1967. Vol. 19. P. 540–558.
11. Wiin-Nielsen A., Chen T.-C. Fundamentals of Atmospheric Energetics. New York, NY: Oxford University Press, 1993. 376 p.
12. Monin A.S., Yaglom A.M. Statisticheskaya gidromekhanika. 2nd ed., St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996. Vol. 2. 742 p. (in Russian).
13. Mirabel A.P., Monin A.S. Two-dimensional turbulence. *Uspekhi Mekhaniki*. 1979. Vol. 2. No. 3. P. 47–95 (in Russian).
14. Danilov S.D., Gurarie D. Quasi-two-dimensional turbulence. *Phys. Usp.* 2000. Vol. 43. P. 863–900.
15. Lilli D.K. Numerical simulation of two-dimensional turbulence. *Phys. Fluids*. Suppl. II. 1969. Vol. 12. II-240 – II-249.
16. Shapovalova N.S. *Proceedings of the Hydrometeorological Center of the USSR*. 1987. Issue. 278. Pp. 90–99 (in Russian).
17. Taylor G.I. The spectrum of turbulence. *Proc. R. Soc. London. Ser. A*. Vol. 164. P. 476–490.

18. Starr V.P. Physics of Negative Viscosity Phenomena. New York: McGraw-Hill, 1968.
19. Monin A.S. Hydrodynamic theory of short-range weather forecasts. *Sov. Phys. Usp.* 1969. Vol.11. P. 746–767.
20. Vinogradskaya A.A., Vlasova I.L., Datsenko N.M., Sonechkin D.M. *Proceedings of the USSR Hydrometeorological Center*. 1988. Issue. 297. P. 150–165 (in Russian).
21. Ogura Y. Energy transfer in a normally distributed and isotropic turbulent velocity field in two dimension. *Physics Fluids*. 1962. Vol. 5. No. 4. P. 395–401.
22. Namias J. The index cycle and its role in the general circulation. *J. Meteorol.* 1950. Vol. 8. P. 131–140.
23. Webster P.J., Keller J.L. Atmospheric variations: vacillation and index cycle. *J. Atmos. Sci.* 1975. Vol. 32. P. 1283–1300.
24. Dickey J.O., Ghil M., Marcus S.L. Extratropical aspects of the 40-50 day oscillation in length-of-day and atmospheric angular momentum. *J. Geophys. Res.: Atmosphere*. 1991. Vol. 96. No. D12. P. 22643–22658.
25. Lovejoy S., Schertzer D. Scale invariance in climatological temperatures and the spectral plateau. *Annales Geophysicae*. 1986. Vol. 4B. P. 401–410.
26. Blinova E.N., Marchuk G.I. *Proceedings of the Institute of Atmospheric Physics of the Academy of Sciences of the USSR*. 1958. No. 2. P. 106–113 (in Russian).
27. Marchuk G.I. *Proceedings of the Institute of Atmospheric Physics of the Academy of Sciences of the USSR*. 1958. No. 2. P. 114–118 (in Russian).
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. Saltzman B., Fleisher A. The exchange of kinetic energy between larger scales of atmospheric motions. *Tellus*. 1960. Vol. 12. P. 374–377.
30. 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.
31. Silberman I. Planetary waves in the atmosphere. *J. Meteorol.* 1954. V. 11. P. 27–34.
32. Elsasser H.W. Evaluation of spectral versus grid methods of hemispheric numerical weather prediction. *J. Appl. Meteorol.* 1966. Vol. 5. P. 246–262.
33. Madden R.A., Julian P.R. Observations of the 40–50 day tropical oscillation – a review. *Mon. Wea. Rev.* 1994. Vol. 122. P. 814–837.
34. Donald A., Meinke H., Power N., de Maia H.N., Wheeler M.C., White N., Stone R.C., Ribbe J. Near-global impact of the Madden – Julian Oscillation on rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33. L09704.
35. Zhang C. Madden – Julian Oscillation. Bringing weather and climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2013. Vol. 94. P. 1849–1870.
36. Huybers P., Curry W. Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability. *Nature*. 2006. Vol. 441. P. 329–332.
37. Saffman P.G. A note on the spectrum and decay of random two-dimensional vorticity distributions at large Reynolds number. *Studies in Applied Mathematics*. 1971. Vol. 50. No. 4. P. 377–383.

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.: Гидрометеиздат, 1979; Стохастичность в моделях общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 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