

В.Н. Еремеев¹, А.Н. Жуков², Н.Е. Лебедев², А.А. Сизов²

КВАЗИШЕСТИДЕСЯТИЛЕТНИЙ ЦИКЛ МУССОННОЙ ОБЛАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

По данным реанализа, стационарных измерений в пределах последних 60–100 лет и палеореконструкций исследовано пространственно-временное распределение ~60-летнего колебания для части гидрометеорологических, гидрофизических и геофизических параметров Аравийского моря и Индийского океана. На этой основе рассмотрены доминирующие в настоящее время климатические тенденции изменчивости указанных параметров для разных частей региона и особенности их спектральных структур.

Ключевые слова: муссон Индийского океана, данные реанализа и стационарных измерений, палеореконструкции, междекадная изменчивость, ~60-летний цикл.

Область Азиатского муссона можно разделить на Индийскую и Восточноазиатскую подсистемы. На рис. 1 размеры этой области показаны оранжевой линией, в соответствии с [50]. Значительную часть Индийской подсистемы занимает Аравийское море. Для исследований этого региона характерен недостаток данных контактных измерений на масштабах десятилетий, что приводит к различиям и даже противоречиям в оценках климатических тенденций межгодовых колебаний его различных параметров. В статье [30] показано, что за период 1985–2008 гг. величины межгодовых колебаний таких параметров Аравийского моря, как атмосферное давление, температура воды и концентрация хлорофилла a в его поверхностном слое в основном не выходили за пределы их средних климатических вариаций последних 30–40 лет. Был также сделан предварительный вывод, что основные воздействия, существенно меняющие режим муссонной циркуляции Аравийского моря, связаны не только с большими, чем размеры моря, масштабами по пространству (порядка 5000–8000 км), но и с большими, чем исследованный период, масштабами по времени (~40–60 и более лет). В такой изменчивости в пределах столетия основную роль играет квазипериодическое колебание с периодом 60 лет. В ближайшие годы положительный полупериод его, видимо, должен смениться отрицательным, что связано с установлением в Индийском океане отрицательной фазы индекса индоокеанского диполя (IOD) на этом масштабе с известными последствиями [39].

На фундаментальное значение данного колебания для междекадной изменчивости и его возможную связь с солнечной активностью сейчас часто указывается в литературе [8, 12, 40–42, 50]. Вместе с тем особенности его действия и пространственно-временного распределения для конкретных регионов, в том числе для муссонной

области Индийского океана, пока исследованы недостаточно [17, 32]. Кроме того, в диапазоне 40–100 лет известно действие и других колебаний, например, с периодом 40, 70 или 80–90 лет (цикл Глейсберга) [6, 43, 48].

Работы, посвященные рассматриваемой тематике, чаще всего связаны с временной реконструкцией колебаний гидробиологических характеристик, например, численности сардин и анчоусов по анализу чешуи в колонках донных осадков [22]. Отчасти это следствие недостаточной длины имеющихся физических рядов стационарных наблюдений [8,12]. В тех же случаях, когда исследуются более длинные ряды палеореконов, основное внимание обычно уделяется колебаниям с периодами от 100 и более лет для изучения солнечно-земных и других внешних связей в рамках астрономических циклов [17, 23, 26, 50].

Цель данной работы – проверка вышеуказанного предположения относительно 60-летнего колебания с помощью наиболее протяженных по времени рядов из массивов реанализа и стационарных измерений параметров атмосферы и гидросферы, а также отдельных палеореконов Индийского океана и исследование особенностей его пространственно-временного распределения для муссонной области этого региона.

Использованные в работе среднемесячные данные стационарных измерений атмосферного давления (P , гПа), температуры воздуха (t_a , °C) в приземном слое, давления водяного пара (e , гПа) и осадков (R , мм) взяты из базы NCDC (<http://dss.ucar.edu/data-sets/ds570.0>). Источником аналогичных данных по уровню моря (SSH) (η , мм) была база данных PSMSL (<http://www.psml.org/data>). Кроме того, для анализа были использованы массивы реанализа среднемесячных значений атмосферного давления (P , гПа) (<http://index-of/pub/>

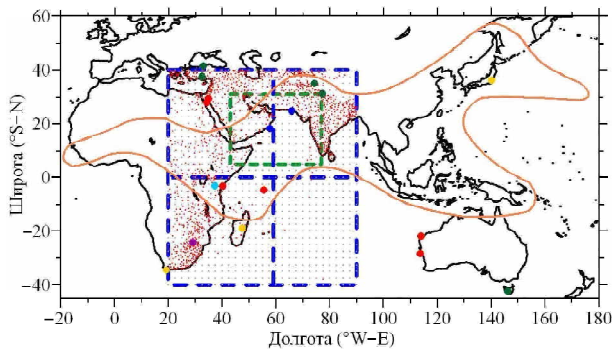


Рис. 1. Расположение метеостанций NCDC (красные точки) и узлов сетки массива реанализа атмосферного давления (серые точки) Индийского океана, данные которых были использованы в работе, а также муссонных областей в Азии, Африке и Австралии (оранжевый контур). Красные кружки – станции рядов палеореконовструкций по коралловым рифам, синие – по донным отложениям, зеленые – по дендрохронологическим данным, голубые – по ледовым кернам, фиолетовые – по сталагмитам; желтые кружки – геомагнитные станции

reanalysis-1/month/grb2d.lola/) за 1949–2010 гг. на сетке $2,5^\circ$ и температуры воздуха (t_a , $^\circ\text{C}$) за 1948–2007 гг. в приземном слое, а также воды (t_w , $^\circ\text{C}$) за 1948–2010 гг. в поверхностном слое на сетке $1,9^\circ$ и скорости ветра (U , V , м/с) за 1948–2010 гг. из базы NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data-reanalysis/reanalysis.shtml>) на сетке $2,5^\circ$. Был также использован массив реанализа по осадкам (<http://gpcc.dwd.de>) за 1901–2009 гг. на сетке $2,5^\circ$ Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) [44].

С учетом результатов [30] для анализа был выбран фрагмент поверхности в пределах 40° с. ш. – 40° ю. ш., 20° – 90° в. д. На рис. 1 контуром зеленого цвета показана область анализа, рассмотренная в [30]. Для осреднения временных рядов массивов реанализа использовались четверти выбранного фрагмента (контуров синего цвета) – северо-запад (СЗ), северо-восток (СВ), юго-запад (ЮЗ) и юго-восток (ЮВ) с границами между севером и югом по 0° с. ш., между западом и востоком – по 59° в. д. Последняя величина – компромиссная между местом геометрического центра фрагмента и географическим расположением особенностей полей отдельных параметров. Пропуски в данных заполнялись, как и в работе [30].

Длина рядов реанализа не превышает 63 года, а большинства наиболее протяженных рядов стационарных наблюдений массива NCDC – 120–130 лет. Поэтому для анализа также были использованы ряды палеореконовструкций по коралловым рифам и донным отложениям из баз данных World Data Center A – Paleoclimatology (<http://medias.obs-mip.fr/paleo/datalist.html#coral>). Это ряды содержания изотопа ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) в коралловых рифах в Малинди (Кения, $3,2^\circ$ S, $40,2^\circ$ E) за 1801–1994 гг. [29] и на о-ве Маэ (Сейшельские острова, $4,7^\circ$ S, $55,5^\circ$ E) за 1847–1994 гг. [28] с дискретностью 2 месяца. Четыре аналогичных ряда представляют

коралловые рифы побережья Западной Австралии – Нингалоо – ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$, ‰), ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) ($21,91^\circ$ S, $113,97^\circ$ E) за 1878–1994 гг. [38] и скалы Хаутмен – ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$, ‰), ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) ($28,46^\circ$ S, $113,77^\circ$ E) за 1794–1993 гг. [37].

Ряды содержания изотопа ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) в коралловых рифах в Акаба (Иордания, $29,43^\circ$ N, $34,97^\circ$ E) за 1788–1992 гг. [33] и в Рас-Умм-Сидд (Египет, $27,85^\circ$ N, $34,31^\circ$ E) за 1751–1995 гг. [31] характеризуют северо-запад Красного моря. Запад и северо-восток Аравийского моря представляют два ряда по донным отложениям. Это отложения фораминифер *Globigerina bulloides* (Оман, $18,23^\circ$ N, $57,67^\circ$ E), в ‰, относительно всех других видов фораминифер за 1053–1993 гг. [20] (ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/anderson2002/anderson2002.txt), приведенные сплайн-интерполяцией к виду с равной дискретностью 10 лет, и донные отложения (логарифм толщины годовых слоев, мм) на шельфе Пакистана ($24,83^\circ$ N, $65,92^\circ$ E) за последние 2040 лет до 1993 г., также приведенные сплайн-интерполяцией к виду с равной дискретностью 4 года. В оригинале [23] последний ряд представлен за 5000 лет с дискретностью ~ 1 год после логарифмирования и сглаживания фильтром с периодом 7 лет.

Из той же базы данных World Data Center A были получены дендрохронологические данные (<http://medias.obs-mip.fr/paleo/ftp-treering.html>) в виде толщины годовых колец (мм) для района г. Симла на севере Индии ($31,2^\circ$ N, $77,23^\circ$ E) за 1590–1989 гг. [24] и в Турции, около городов Ак-виран и Эфляни ($37,5^\circ$ N, $32,5^\circ$ E и $41,5^\circ$ N, $33,0^\circ$ E), за 1567–1995 и 1607–2001 гг. [18]. Аналогичные ряды по годовым кольцам деревьев в Австралии (о-ва Тасмания, $42,39^\circ$ S, $146,34^\circ$ E) за 1028–1975 гг. и Индии (Кашмир, Гималаи, $35,08^\circ$ N, $74,3^\circ$ E) за 1604–1980 гг. были взяты из: Time Series Data Library by R. Hyndman and M. Akram (<http://robjhyndman.com/TSDL/tree-rings/>). Дополнительно в качестве наиболее длинных реконструкций использованы один из рядов (KNIF2) содержания ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) в керне ледника на вершине г. Килиманджаро (Танзания, $3,07^\circ$ S, $37,35^\circ$ E) за 460–1950 гг. с дискретностью 10 лет [46] и отрезки 6450-летних рядов содержания ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) и ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$, ‰) в сталагмитах в Южной Африке за последние 2000 лет ($24,20^\circ$ S, $29,20^\circ$ E) [34].

Аналитическая основа работы – один из вариантов метода внутриспектрального анализа (ВСА) как реализации ритмодинамического (резонансно-волнового) подхода [5]. Поиск исследуемых колебаний осуществлялся с помощью преобразования Фурье, а их выделение из исходных рядов – методами цифровой фильтрации, в основном фильтрами скользящего среднего (ФСС) [14]. При этом для описания изменчивости природных процессов использова-

лась модель полифонического фрактально-волнового вибратора (МПФВ). Она представляет собой иерархическую систему полифонических квазипериодических осцилляторов, обладающих общими свойствами многоуровневой, самоподобной (вложенной) амплитудной модуляции и резонансного взаимодействия между основными тонами и обертонами действующих в системе колебаний [5].

Фрактальные множества по математическим признакам совмещают черты двух типов самоподобия – вихревого (по логарифмическому закону) и ветвящегося (по дихотомическому способу). Фрактальное, p -адическое пространство – время в современной математической физике структурно есть иерархия вложенных циклов [3]. МПФВ дает возможность объединения этих двух типов самоподобия в одной модели. Такая колебательная система, состоящая из разномасштабных циклов – волн (или вихрей в пространстве) со связывающей эти циклы между собой ветвящейся (древовидной) функциональной структурой, по сути аналогична, например, кровеносной системе тела человека и может иметь то же назначение – передачу (транспортировку) и трансформацию потока энергии от макромасштабов к микромасштабам взаимодействий и обратно.

Во многом современное состояние представлений о турбулентности как о множестве разномасштабных линейных и нелинейных фрактальных волн достаточно близко к такому истолкованию [13]. Ниже на этой основе (резонансно-волновой подход и МПФВ) рассмотрен возможный вариант иерархии взаимодействий между разными частотными диапазонами (видами) энергии и, соответственно, вещества.

На столетних масштабах ~60-летнее колебание является существенной частью такого фрактально-волнового механизма кругооборота энергии в планетарных масштабах. В данном случае для его изучения использовались низкочастотные и полосовые фильтры скользящего среднего (НЧ ФСС и ПФСС) с центральным положением точки осреднения. В сочетании с возможностями МПФВ это позволяет более широко интерпретировать получаемые результаты, в частности, объяснить наличие амплитудной модуляции выделяемых таким образом колебаний [5, 6]. Существование такой модуляции показано во многих, близких по тематике исследованиях, например в [27].

Для анализа изменчивости указанных выше параметров было выбрано их представление в виде рядов средних годовых величин. На междокадных масштабах данная величина как интегральная характеристика достаточна для изучения ритмодинамики исследуемых параметров [6–8]. При этом в средних годовых величинах преобла-

дают значения летнего муссона, как более мощного явления [11].

Известно, что для северной части Индийского океана летом Северного полушария, когда над Азией развивается область пониженного атмосферного давления, характерно преобладание юго-западных ветров, а зимой – северо-восточных [11]. Такой тип атмосферной циркуляции связан с устойчивым расположением центров действия атмосферы (ЦДА) в этом регионе и их сезонной динамикой. На рис. 2 приведены примеры полей атмосферного давления для участка между 40° ю. ш. – 40° с. ш., 10 – 90° в. д., полученные по указанным выше данным реанализа.

Непосредственное отношение к механизму муссонной циркуляции северной части Индийского океана имеет явление IOD [39]. Положительной фазе IOD соответствуют положительные аномалии t_w (SST) и осадков на западе Индийского океана и отрицательные аномалии SST на востоке, с которыми связаны засушливые периоды в Индонезии и Австралии. Отрицательная фаза IOD приводит к противоположным условиям, с более теплой водой и большими осадками на востоке Индийского океана и более холодными и сухими условиями на западе. Исследования ископаемых коралловых рифов указывают на то, что IOD функционирует, по крайней мере, с середины голоцена, т. е. не менее 6500 лет [16].

Результаты обработки ряда значений IOD за 1958–2008 гг. (51 год) ФСС с периодом 15 лет представлены в статье [30, fig. 4, a] – очевидно наличие положительной фазы IOD после 1980 г. и отрицательной до 1980 г. Однако длина этого ряда не позволила однозначно идентифицировать выявленную трендоподобную составляющую как часть более длинного колебания, чем длина ряда. Поэтому аналогичная процедура была выполнена для указанных выше рядов реанализа и наиболее длинных рядов стационарных наблюдений по данным NCDC и PSMSL.

Ряды реанализа были обработаны ФСС с периодами в диапазоне 20–30 лет и сглажены тем же фильтром с периодом 10 лет. На рис. 3 видно, что основная роль в области НЧ исследованных рядов принадлежит полупериодам квазипериодических колебаний продолжительностью ~60–70 лет. При этом заметна определенная разница в фазах и периодах колебаний для разных параметров и четвертой исследуемого фрагмента.

Все кривые атмосферного давления представляют примерно полупериод ~60-летнего колебания, но над сушей (особенно в ее высокогорной части) его амплитуда заметно больше, чем над океаном. Кроме того, над океаном максимум и минимум цикла смещены по времени относительно суши на востоке примерно на 5–7 лет назад, а на западе – вперед. По особенностям кривых

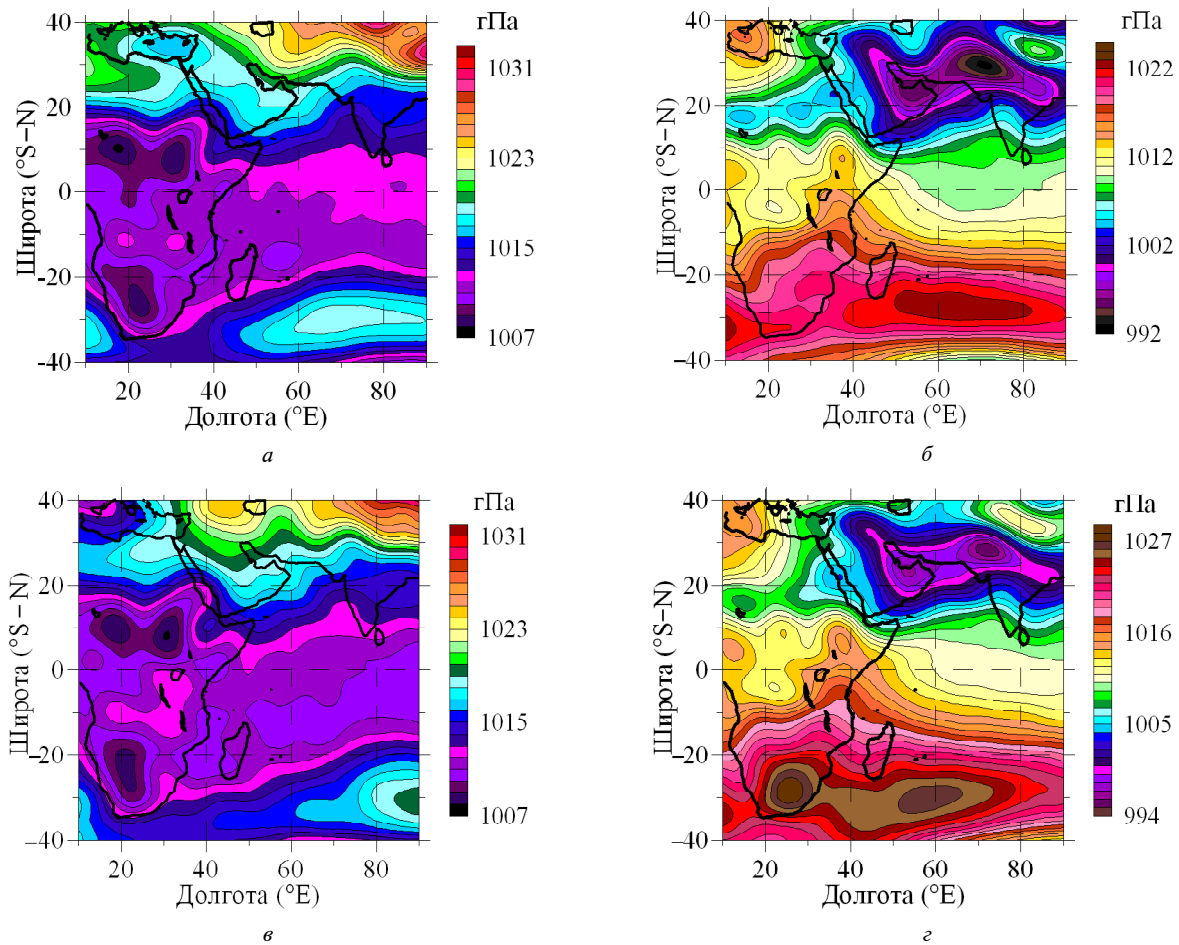


Рис. 2. Поля атмосферного давления над Индийским океаном по данным реанализа в январе (а) и июле (б) 1949 г., в январе (в) и июле (г) 2009 г.

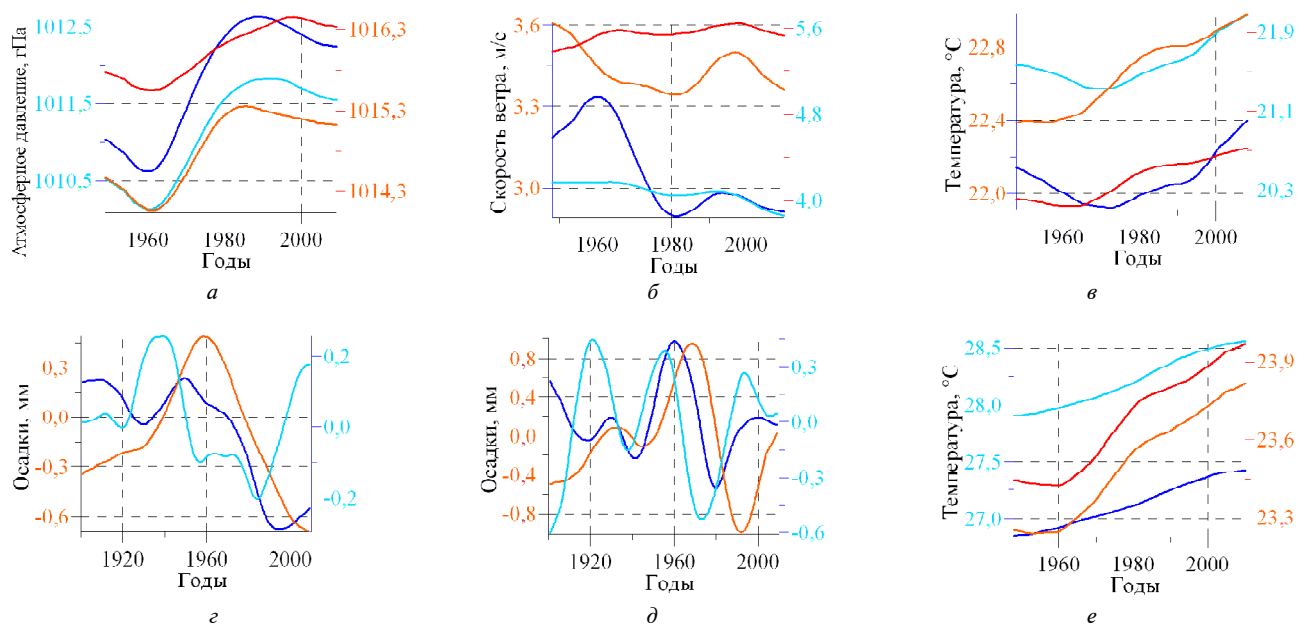


Рис. 3. НЧ-составляющие рядов среднегодовых значений по данным реанализа для атмосферного давления (а), модуля вектора скорости ветра (б), температуры воздуха (в), осадков (г, д) и температуры воды (е) для СЗ- (синий цвет), СВ- (голубой), ЮЗ- (оранжевый) и ЮВ- (красный) четвертей исследуемого фрагмента

на рис. 3, а можно предположить, что на севере Аравийского моря процесс завершения положительного полупериода этого колебания по атмосферному давлению, по-видимому, будет длиться дольше, чем на юге. Характерно, что на межгодовых масштабах атмосферное давление изменяется диаметрально противоположно годовому ходу — в периоды потепления (т. е. “летом”) растет, а в периоды похолодания (т. е. “зимой”) падает.

Подобным образом ведут себя НЧ-составляющие рядов температуры воздуха (рис. 3, в) и воды (рис. 3, е). Здесь также наблюдается минимум в 60-е годы и максимум в 90-е. Причем, если для t_a кривые южных четвертей опережают по фазе кривые северных четвертей, то для t_w — наоборот. Для обеих температурных кривых на рис. 3, как и для НЧ-составляющих рядов скорости ветра (рис. 3, б) и количества осадков (рис. 3, г), заметно влияние другого колебания с периодом ~30 лет. Для осадков, ряды которых наиболее длинны, это колебание, полученное аналогичным образом с помощью ФСС, показано на рис. 3, д.

Данная особенность хорошо соответствует результатам спектрального анализа исследованных рядов. Практически во всех полученных с помощью полного преобразования Фурье спектрах помимо гармоник с периодом ~60 лет доминируют еще три группы гармоник — 20–30, 10–15 и 3–5 лет. Причем именно первая группа (20–30 лет) чаще всего наиболее выражена. Для давления влияние третьей группы (3–5 лет) значимо только в юго-восточной четверти. В спектрах рядов температуры воздуха и воды, напротив, вклад этой группы гармоник сопоставим с амплитудой НЧ-гармоник для всех четвертей. Для модуля скорости ветра амплитуды 30-летних гармоник близки к амплитуде ~60-летней гармоник, а на юго-востоке — больше нее. В определенной степени отличаются от этой картины спектры более длинных рядов реанализа по количеству осадков. В них амплитуды гармоник с периодом < 20 лет во всех четвертях в 1,5–2 раза превышают амплитуды НЧ-гармоник, а на северо-востоке амплитуда ~60-летней гармоник уступает им более чем в 5 раз.

Росту атмосферного давления и температуры воздуха и воды по кривым ~60-летней гармоник за период реанализа сопутствует снижение модуля скорости ветра для всех четвертей, кроме юго-восточной. Данные анализа по количеству осадков для этой четверти на рис. 3 не представлены ввиду их отсутствия в исходном массиве. В отличие от других параметров для первичной фильтрации НЧ-составляющих рядов осадков использовался ПФСС в диапазоне 50–70 лет. Следствием этого стало уменьшение их амплитуды в сравнении с другими параметрами.

Из рис. 3, г следует, что тенденции в изменении количества осадков на данном масштабе из-

менчивости по четвертям были в основном близкими к таковым для других параметров, но с существенным фазовым сдвигом. В наибольшей степени этот сдвиг проявился на юго-западе — кривые изменения количества осадков оказались в противофазе с аналогичными кривыми по атмосферному давлению и температуре воздуха и воды. Из рис. 3, г, д и в целом из всего рис. 3 видно, насколько активно влияет недостаточная отфильтрованность колебания с периодом ~30–40 лет на возможность оценки фазы более низкочастотных колебаний.

Длина рядов реанализа не превышает одного периода исследуемого колебания. Поэтому таким же образом были обработаны наиболее длинные (≥ 60 лет) среднегодовые ряды стационарных наблюдений по атмосферному давлению, температуре воздуха, давлению водяного пара и количеству осадков части станций массива NCDC для побережья Аравийского моря и юга Африки. Были также использованы ряды измерений уровня моря по данным PSMSL. Для их первичной обработки применялись ФСС с периодами ~2/3 от длины рядов. Полученные результаты сглаживались ФСС с периодами 11–13 лет.

На рис. 4, а приведены соответствующие примеры по атмосферному давлению для трех станций: Лахор (Пакистан, 31,6° с. ш., 74,3° в. д., 1941–2007 гг.), Керкира (Греция, 39,6° с. ш., 19,9° в. д., 1951–2007 гг.) и Дурбан (ЮАР, 29,9° ю. ш., 30,9° в. д., 1912–2007 гг.). По этому параметру для станции Дурбан на рис. 4, а виден хорошо выраженный фрагмент ~60-летнего колебания, по продолжительности несколько больший одного его периода. Достаточно близки к этому фрагменту и НЧ-составляющие более коротких рядов для станций Лахор и Керкира. Кроме того, в этом случае, как и на рис. 3, заметна разница в фазах рядов порядка 5–10 лет.

Аналогичные кривые для температуры воздуха (рис. 4, б) представлены для станций Порт-Элизабет (ЮАР, 34,0° ю. ш., 25,6° в. д., 1885–2007 гг.), Лахор (1876–2007 гг.) и Тируванантапурам (Индия, 8,5° с. ш., 77,0° в. д., 1892–2007 гг.). В данном случае длина рядов близка к полутора периодам исследуемого колебания. Все три кривые имеют хорошо выраженную форму, но с разными значениями амплитуд и фаз колебания до и после 50-х годов. Небольшие значения этих амплитуд (~0,1 °C) — следствие сглаживающих свойств ФСС, после обработки которых амплитуда исходных сигналов уменьшается в 2–3 раза [14].

Примеры результатов фильтрации рядов среднегодовых значений количества осадков показаны на рис. 4, в для трех индийских станций: Ахмадабад (23,0° с. ш., 72,6° в. д., 1869–2007 гг.), Мумбаи (Бомбей) (18,9° с. ш., 72,8° в. д., 1847–2007 гг.) и Пуна (18,5° с. ш., 73,9° в. д., 1856–2007 гг.).

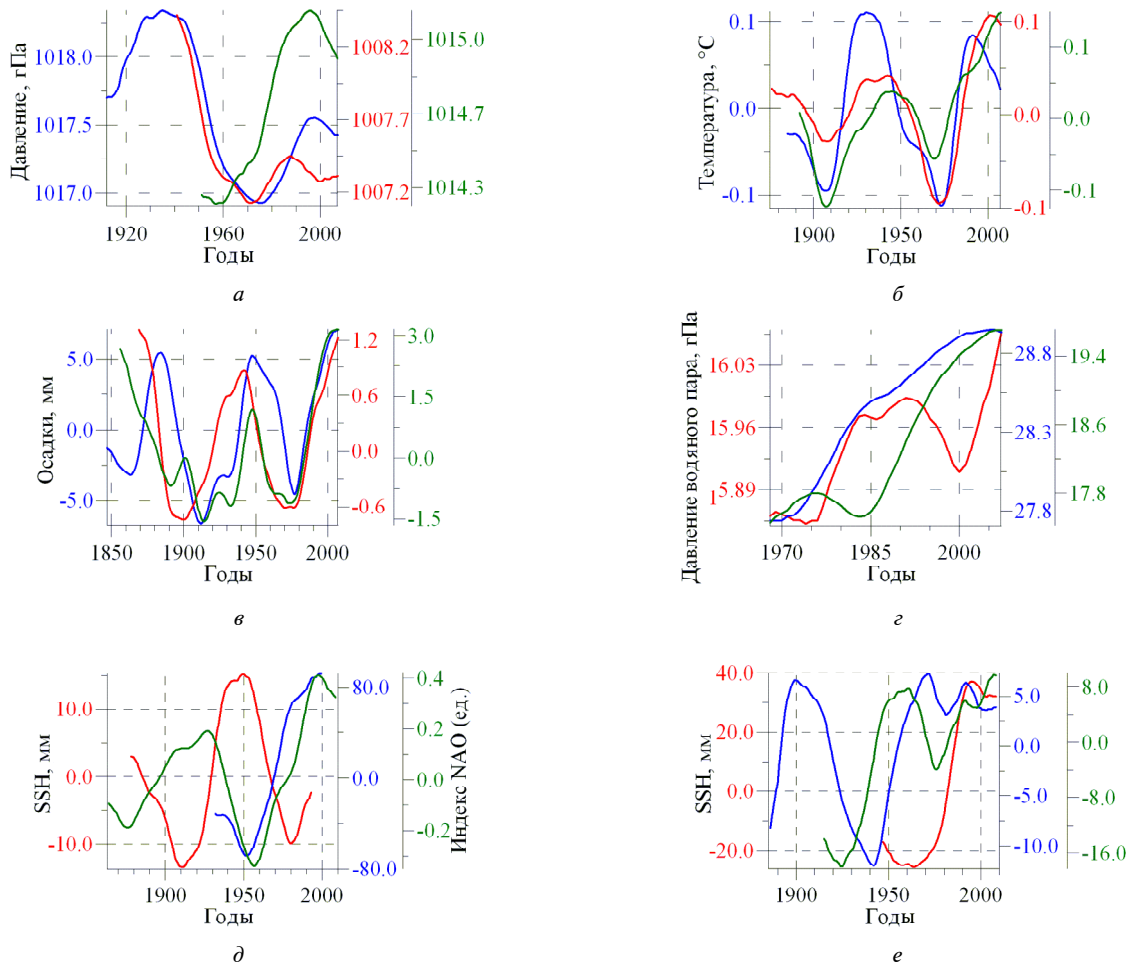


Рис. 4. НЧ-составляющие рядов среднегодовых значений. По данным NCDC: а – атмосферного давления для Лахора (красный цвет), Керкиры (зеленый) и Дурбана (синий); б – температуры воздуха для Порт-Элизабет (синий цвет), Лахора (красный) и Тируванантапурама (зеленый); в – количества осадков для Ахмадабада (красный цвет), Мумбаи (синий) и Пуны (зеленый); г – давления водяного пара для Тируванантапурама (синий цвет), Индаура (красный), Джайкобабада (зеленый); по данным PSMSL: д – уровня моря для Мумбаи (красный цвет), Калькутты (синий) и индекса NAO (зеленый); е – для Легаспи, Филиппины (красный цвет), Сиднея (синий) и Фремантла (зеленый), Австралия

Эти ряды длиннее предшествующих, и разница в фазах НЧ-составляющих становится более заметной, особенно на отрезке до 1900 г. Среднее значение периодов выделенных колебаний составляет 50–70 лет. Как и на рис. 3, здесь на примере ряда для станции Пуна заметно влияние другого колебания с периодом ~25–30 лет.

Ряды среднегодовых значений давления водяного пара воздуха наиболее короткие. НЧ-составляющие этих рядов показаны на рис. 4, г для двух индийских станций Индаур (22,7° с. ш., 75,8° в. д., 1968–2007 гг.) и Тируванантапурам (1968–2007 гг.), а также станции Джайкобабад (Пакистан, 28,3° с. ш., 68,46° в. д., 1968–2007 гг.). Полученные кривые можно было бы интерпретировать как меньшие по протяженности, но аналогичные кривым рис. 4, а–в фрагменты ~60-летнего колебания. Однако для полноценной идентификации исследуемого колебания длина рядов по данному параметру, безусловно, недостаточна. Вместе с тем заметим, что на кривых для станций Джайкобабад и Индаур, как и на

рис. 4, в, выделяется фрагмент колебания с периодом ~25–30 лет, но с разными фазами.

На рис. 4, д, е показаны НЧ-составляющие рядов среднегодовых значений уровня моря по данным PSMSL для станций Мумбаи и Калькутта (Индия, 18,9° с. ш., 72,8° в. д., 1878–1993 гг. и 22,6° с. ш., 88,3° в. д., 1932–1999 гг.), Легаспи (Филиппины, 13,2° с. ш., 123,8° в. д., 1947–2008 гг.), Сидней и Фремантл (Австралия, 33,9° ю. ш., 151,2° в. д., 1886–2008 гг. и 32,1° ю. ш., 115,7° в. д., 1915–2008 гг.). Все кривые на этих рисунках в общих чертах также представляют собой разной длины фрагменты колебаний с периодами ~60–80 лет. При этом между ними наблюдаются существенные фазовые различия. Так, кривые для станций Мумбаи и Калькутта находятся в противофазе. Вместе с тем близки по фазе изменения уровня моря для станций Калькутта и Легаспи, Мумбаи и Фремантл (запад Австралии). Кривая для станции Сидней (восток Австралии) находится по фазе в промежуточном положении относительно этих двух пар пунктов наблюдений.

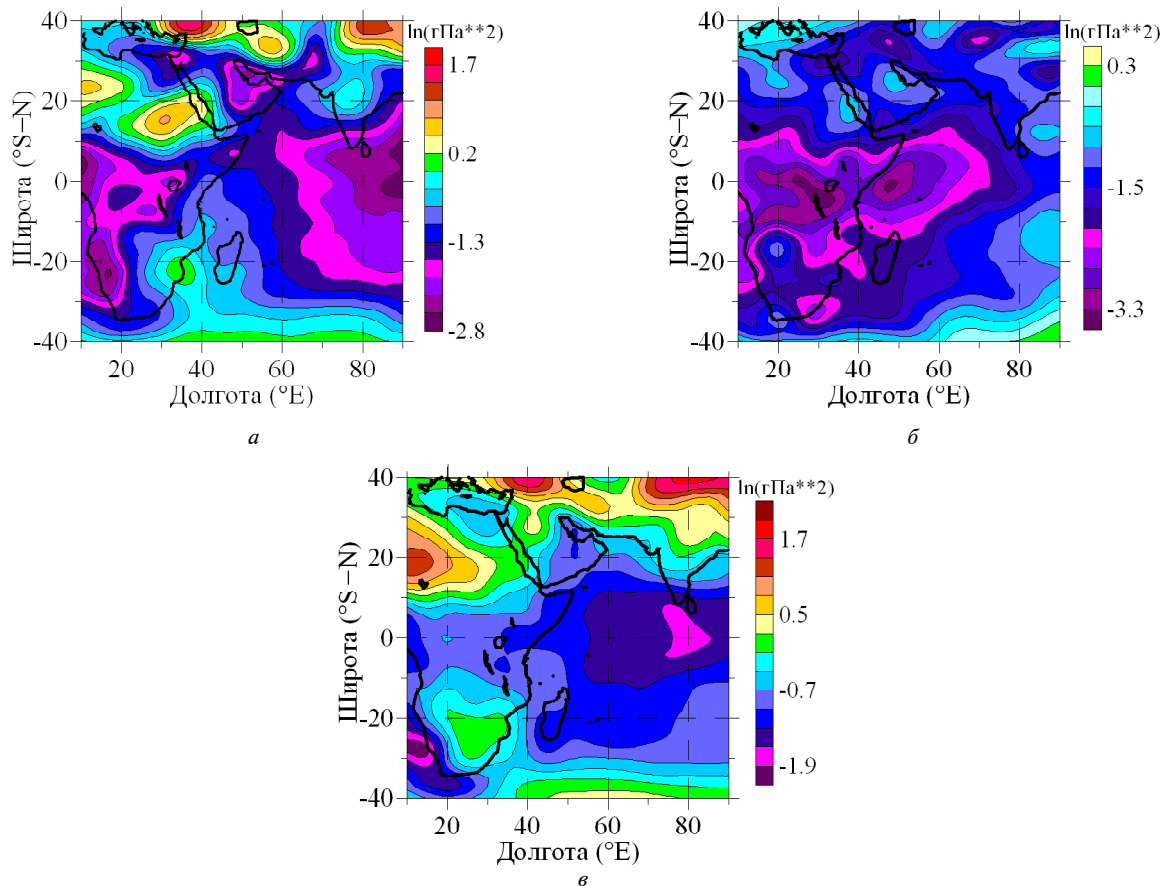


Рис. 5. Поля натурального логарифма дисперсии среднегодовых значений атмосферного давления Индийского океана по данным реанализа за 1955–1965 (а), 1990–2001 (б) и 1949–2009 гг. (в)

Обобщение результатов, полученных для большей части региона Индийского океана (см. рис. 1, а) показало, что ~60-летнее колебание входит в число основных доминант в спектрах большинства исследованных рядов. В этих спектрах амплитуда исследуемого колебания чаще всего сравнима с амплитудами гармоник с периодами ~9–15 и 20–25 лет. В то же время постоянно отмечаются различия в амплитудах и фазах данного колебания для разных станций наблюдений по всем исследованным параметрам. Последнее частично может быть связано с разницей в длине исходных рядов, их временных границах и в периоде использованных ФСС. Однако и при равенстве всех рассматриваемых величин для части станций разница в амплитудах и фазах НЧ-составляющих рядов их наблюдений сохраняется, т. е. указанное явление имеет объективный характер. Возможный вариант его объяснения приведен ниже.

Общий характер пространственно-временной изменчивости исследованных выше рядов в пределах столетнего интервала может быть хорошо продемонстрирован с помощью такого параметра, как дисперсия (σ). На рис. 5 в качестве примера представлены поля натурального логарифма дисперсии рядов среднегодовых значений атмосферного давления для Индийского океана по данным реанализа в целом за 1949–2009 гг. и отдельно для отрезков 1955–1965 и 1990–2001 гг., как наи-

более контрастно характеризующих смену фаз ~60-летнего цикла [30]. Логарифмирование было использовано, поскольку для некоторых районов значения σ были в 5–6 раз больше фоновых, и это маскировало подробную структуру поля.

Из рис. 5, в видно, что наиболее активными областями, с точки зрения интенсивности изменений атмосферного давления за 1949–2009 гг. в этих географических пределах в порядке роста дисперсии, являются Южная Африка (к югу от 20° ю. ш.), Северная Африка (между Красным морем и Алжиром), район Малой Азии и Большого Кавказа (между Средиземным и Каспийским морями) и Тибетское плато. Наиболее динамичные районы – западное побережье Южной Африки и обширный участок южнее и юго-западнее о-ва Шри-Ланка. Практически эти же области существовали и в течение 1955–1965 гг. (рис. 5, а), но σP в районе Малой Азии ($\sigma P_{\max} \approx 5,0$) становится в ~1,5–2 раза больше, чем в районе Тибета. Области низких значений σ ($< 0,3$) распространяются на районы Центральной Африки, части Южной Африки, Аравийского полуострова и Восточного Средиземноморья.

Для периода 1990–2001 гг. (рис. 5, б) в структуре поля σP произошли существенные изменения. Значения σ в основном становятся ниже 0,5. Широкая полоса наиболее низких значений σP ($< 0,2$) в центре и на юге Индийского океана

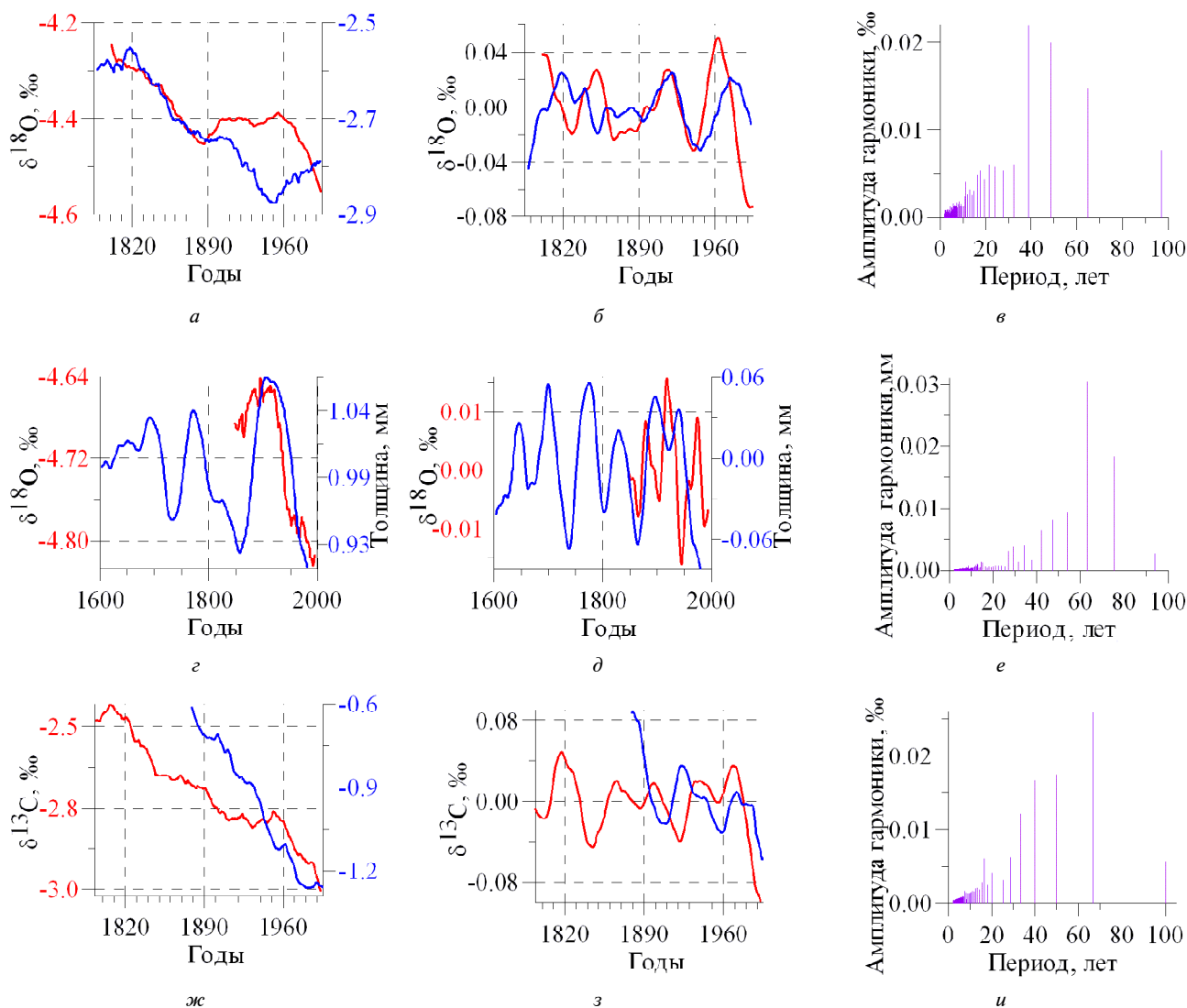


Рис. 6. НЧ-составляющие рядов палеореконов: а – содержания $\delta^{18}\text{O}$ в коралловых рифах в Малинди (красный цвет) и в Акаба (синий); г – то же на о-ве Маэ (красный) и по годовым кольцам деревьев в Кашмире (синий); ж – содержания $\delta^{13}\text{C}$ в рифах Абролхос (красный) и Нингалуо (синий) после ФСС; б, д, з – их 60-летняя составляющая; ее спектры: в – Малинди, е – Кашмир, и – Абролхос

отстывает к западу до 60–70° в. д. Восточнее 70° в. д. с юга на север, через Бенгальский залив к Тибету формируется цепочка участков повышенных значений σP . Наиболее активным из них ($\sigma P > 1,2$) является район юго-восточной периферии Южноиндийского максимума атмосферного давления. Для остальных $\sigma P \approx 0,4–0,5$. В это время область малоазийской аномалии σP заметно слабеет и смещается более чем на 2000 км к северо-западному побережью Средиземного моря. Ослабевают аномалии σP и в Северной Африке, Иране и на Тибете.

Следует заметить, что крупномасштабные связи аравийского муссона с климатическими условиями Африки, Тибета и сибирского антициклона исследовались неоднократно [19, 25, 49]. Аналогичные связи северо-запада Аравийского моря, в частности, области Аравийской депрессии и регионов Средиземного и Черного морей изучены явно недостаточно [31]. На возможность таких связей указывает приведенная на рис. 4, д кривая

НЧ-составляющей ряда индекса NAO [35], выделенная полосовым ФСС в диапазоне 50–70 лет и сглаженная ФСС с периодом 15 лет.

Наиболее длинные ряды натуральных наблюдений ограничены 2,0–2,5 периодами исследуемого колебания. Поэтому для изучения устойчивости и других пространственно-временных особенностей действия ~60-летнего цикла аналогичная описанной выше процедура фильтрации была использована для палеоклиматических рядов. Примеры полученных после фильтрации результатов представлены на рис. 6. Для выделения наиболее низкочастотных составляющих (трендоподобных) (рис. 6, а, г, ж) использовался ФСС с периодом 40 лет, для ~60-летнего цикла – с периодом 25 лет, после чего результат сглаживался ФСС с периодом 10–15 лет.

Из рис. 6 видно, что все трендоподобные кривые для коралловых рифов в период XIX–XX вв. от западного до юго-восточного побережий Индийского океана имеют одну и ту же тенденцию к

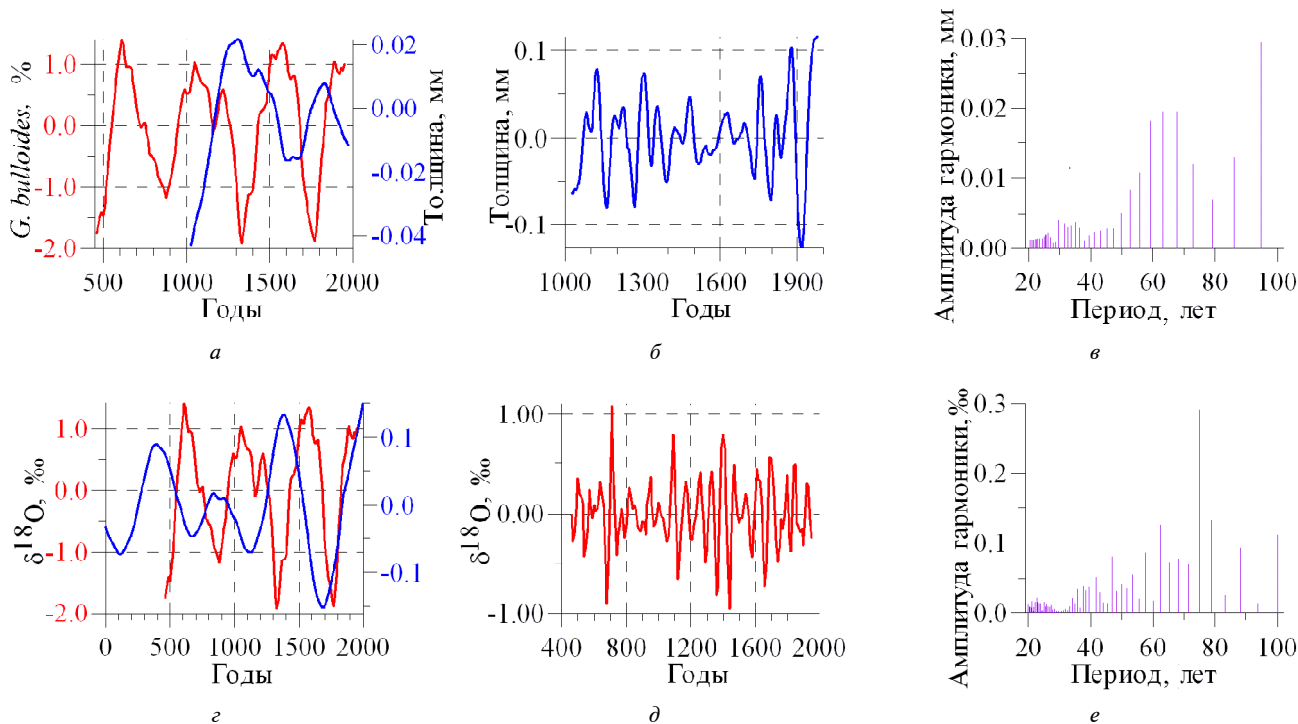


Рис. 7. НЧ-составляющие с периодом 400–600 лет рядов: *а* – отложений фораминифер *G. bulloides* на шельфе Омана (красный цвет) и по годовым кольцам деревьев в Австралии (синий); *в* – содержания $\delta^{18}\text{O}$ в кернах ледника г. Килиманджаро (красный) и в сталагмитах Южной Африки (синий); период ~65–75 лет: *б* – для Австралии, *д* – г. Килиманджаро; *в*, *е* – ВЧ-спектры двух последних рядов соответственно

снижению соответствующих значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$. Эта тенденция совпадает на отрезке после 1900 г. и для более длинного ряда по годовым кольцам деревьев в Кашмире. Вместе с тем в целом по этому ряду явно выделяется фрагмент колебания с периодом ~100–120 лет. Аналогичный результат после указанной выше обработки был получен по всем рядам и для ~60-летнего колебания.

Из рис. 6, в, е, и видно, что в диапазоне от 40 до 70–80 лет, по-видимому, действует не одно или два, а группа междекадных колебаний с достаточно близкими частотами. При этом между кривыми на рис. 6, б, д, з опять наблюдаются заметные фазовые различия, которые на разных временных участках могут изменяться в широких пределах от синфазности до противофазности. Если аналогичным образом обработать более длинный ряд для ледника г. Килиманджаро, то помимо колебания с периодом, близким к изучаемому, в нем можно выделить и более длинные колебания с периодами ~100 лет. Часть из них совпадает с данными [50], часть дополняет их. Одно из таких колебаний показано на рис. 7, г. В этом случае была использована последовательность ФСС с периодами 500, 100, 40 и 20 лет.

Более длинные ряды дают возможность увидеть амплитудную модуляцию ~60-летнего колебания подобно тому, как это показано в [27] на 200-летнем отрезке для коротких циклов с периодами от 4 до 20 лет по содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в сталагмитах на юге Омана. На рис. 7, б ~60-летнее колебание выделено из ряда по годовым кольцам

деревьев в Австралии (Time Series Data Library by R. Hynndman and M. Akram) последовательностью ПФСС с периодами 400–700 и 40–80 лет, после чего сглажено ФСС с периодом 20 лет. Сигнал на рис. 7, б имеет двустороннюю модуляцию, и его огибающая в сглаженном виде близка к колебанию с периодом ~400–600 лет. Эта величина совпадает с аналогичной характеристикой более низкочастотной составляющей этого же ряда (рис. 7, а).

Из ВЧ-спектра ряда (рис. 7, б) видно, что кроме колебания с периодом ~60–70 лет в нем хорошо выражена ~95-летняя гармоника, что близко по величине к циклу Глейсберга. Аналогичный результат показан на рис. 6, г для ряда по годовым кольцам деревьев в Кашмире. В ВЧ-спектре колебания, отфильтрованного из ряда ледника г. Килиманджаро (рис. 7, д), доминирует гармоника с периодом ~75 лет. При этом были последовательно использованы ФСС с периодами 400, 100 и 30 лет. Следуя терминологии [4, 10], сигналы рядов на рис. 7, д и б, б, как и исходного климатического ряда ледника г. Килиманджаро, а также большинства других климатических рядов могут быть названы сложными композиционными, или полифоническими.

Полученные результаты с учетом большой пространственной удаленности друг от друга пунктов наблюдений, данные которых были использованы (восточное побережье Африки, западное побережье Австралии, предгорья Гималаев), указывают на общепланетарный характер исследу-

дованных колебаний. Об этом же свидетельствуют и другие публикации [6, 8, 22, 43, 47, 50 и др.]. В связи с этим ниже рассмотрены возможные связи исследуемого явления с солнечной активностью. Кроме того, как указано выше, эти и другие аналогичные результаты [6, 8, 12, 40, 43, 50] дают основание предположить, что в диапазоне от 40 до 70 лет действует не одно или два, а группа междекадных колебаний с достаточно близкими частотами. Последнее существенно затрудняет их выделение и изучение.

Необходима разработка методов и алгоритмов не просто узкополосной, а режекторной (с широкой полосы пропускания в данном случае не более одного года) фильтрации с возможностью сканирования частотного диапазона исследуемых сигналов, что само по себе является нетривиальной математической задачей [36]. Это позволило бы создать полезное аналитическое дополнение к базовому преобразованию Фурье, жесткая условная сетка частот которого позволяет лишь приблизительно интерполировать, а не воспроизводить исследуемые спектры [9].

Сейчас многое известно о взаимосвязях между состоянием солнечной активности, электромагнитосферы Земли и верхних, а также, опосредованно, нижних слоев атмосферы [1]. Аналогичные связи описаны и для литосферы [2]. Обобщение этих сведений дает возможность предположить, что магнитоэлектрические явления играют роль посредника между солнечной активностью и изменчивостью климата Земли. Ритмодинамический подход и МПФВ в перспективе дают возможность объединения представлений о взаимодействии между подсистемами климата с преобладанием направления причинно-следственных связей от более флюидичных (высокочастотных – электромагнитосфера) к более плотным (низкочастотным – атмосфера, гидросфера, литосфера) на основе свойств фрактальности и резонанса в изменчивости соответствующих процессов и полей [5, 6, 15].

На рис. 8 приведены результаты фильтрации ФСС рядов среднегодовых значений чисел Вольфа (1700–2010) и горизонтальной компоненты напряженности геомагнитного поля Земли (H , нТл) по трем станциям: Какиока (Япония, 36,25° N, 140,15° E, 1913–2006 гг.), Антананариву (Мадагаскар, 18,93° S, 47,52° E, 1902–2006 гг.) и Херманиус (Южная Африка, 34,41° S, 19,23° E, 1941–2006 гг.). Эти ряды получены из базы данных SPIDR в Интернете (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/dataset.do>). Для их обработки использованы последовательно ПФСС в диапазоне 40–70 лет и ФСС с периодом 10 лет для чисел Вольфа и ФСС с периодом 10 лет для H -компоненты. На совпадающем отрезке времени кривые чисел Вольфа и H -компоненты на стан-

ции Какиока (рис. 8, а) близки по форме, но H запаздывает по фазе примерно на 10–15 лет. Сопоставление этих кривых с аналогичными кривыми для параметров атмосферы, приведенными выше или в работе [30], показало, что изменчивость атмосферы также запаздывает относительно H -компоненты на 5–10 лет. Это свидетельствует в пользу предложенного выше направления причинно-следственных связей, однако для серьезных выводов данных о геомагнитном поле пока явно недостаточно.

На рис. 8, а в период 1850–2000 гг. видно действие в основном ~100-летнего цикла, хотя в спектре чисел Вольфа есть гармоники – доминанты и с периодами около 50–70 лет. Кроме того, кривые H -компоненты для Японии и юга Индийского океана находятся, видимо, в противофазе. Таким образом, и в этом случае очевидно наличие разных видов модуляции в исследуемом диапазоне колебаний. Скорее всего, здесь группа колебаний имеет близкие частоты.

Выше упоминалось [17, 42], что ~60-летняя изменчивость муссона связана с солнечной активностью. Однако по другим публикациям, например [21, 32], видно, что маскирующее действие 100-летнего и более низкочастотных колебаний затрудняет обнаружение ~60-летней изменчивости в солнечной активности. Мы использовали для этого более длинный, чем в [21], ряд палеорекострукции чисел Вольфа за последние ~11 000 лет [45].

На рис. 8, в показан отрезок ряда (с 1000 г. до н. э. по 1895 г. н. э.) после ФСС с периодами последовательно 410, 110 и 50 лет. В ВЧ-спектре данного отрезка (рис. 8, з) на общем фоне можно выделить три группы доминант в диапазонах 42–46, 55–65, 70 и 80–90 лет. Последний диапазон относится к циклу Глейсберга. Близкий и даже более очевидный результат был получен после аналогичной обработки для отрезка ряда донных отложений на шельфе Пакистана (рис. 8, д). В его спектре группы доминант находятся в диапазонах 50–60, 70–80 и 90–100 лет (рис. 8, е). Эти величины в основном совпадают с результатами спектрального анализа данного ряда за 5000 лет в [23]. Таким образом, те группы колебаний с близкими частотами в междекадной изменчивости муссона, о которых шла речь выше, в том числе группу колебаний, формирующих ~60-летний цикл и его модуляции, следует искать примерно в этих же областях частот.

На примере поля среднегодовых значений атмосферного давления по данным реанализа можно показать, что связанная с ~60-летним колебанием пространственная динамика Индийской муссонной области (рис. 9, а, б) в первом приближении может быть сведена к изменению размеров и расположения основных областей высо-

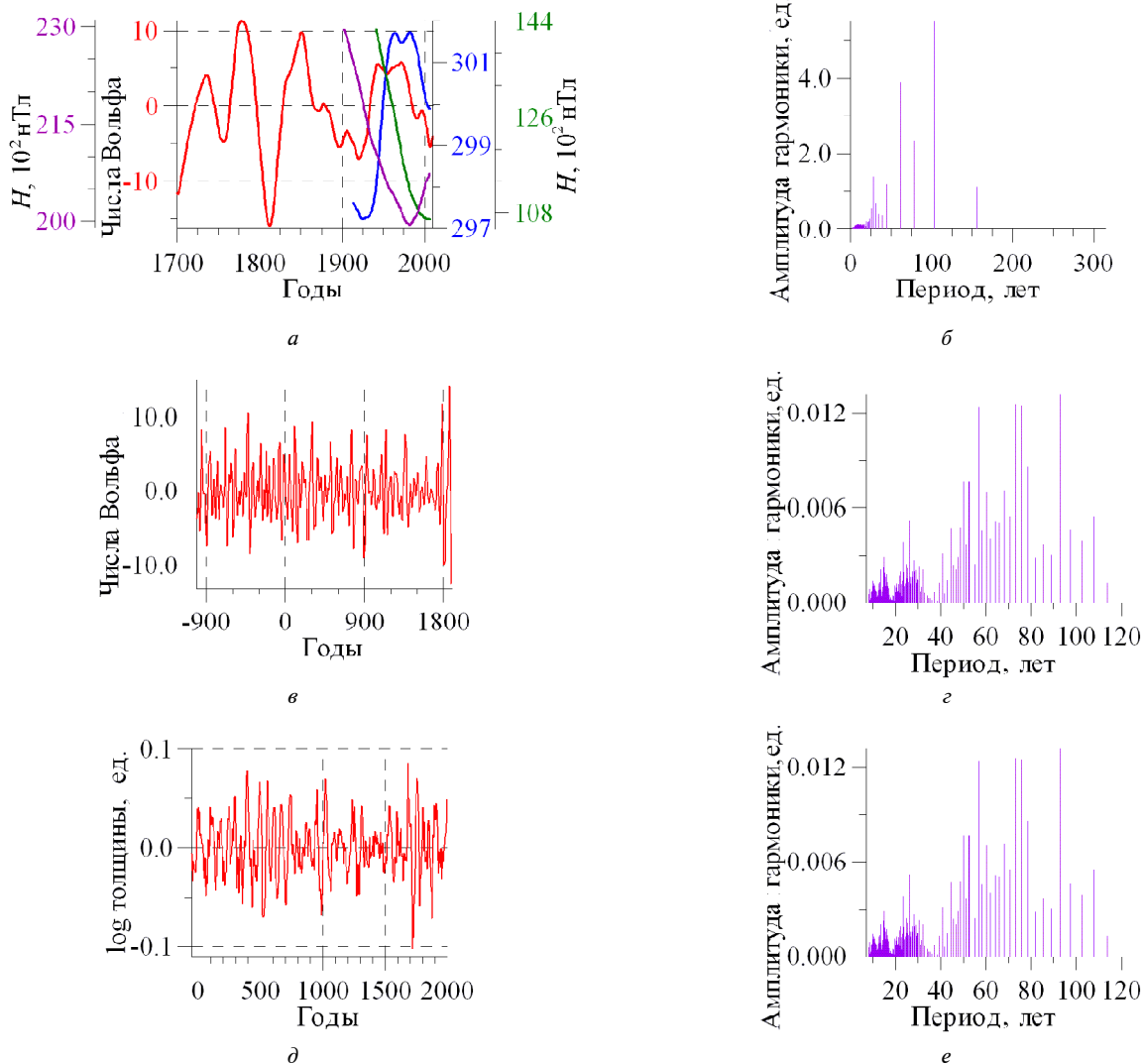


Рис. 8. НЧ-составляющие рядов: *a* – среднегодовых значений чисел Вольфа (красный цвет) и горизонтальной компоненты напряженности геомагнитного поля в Какиока (синий), Германусе (зеленый) и Антананариву (фиолетовый); *б* – спектр НЧ-составляющей чисел Вольфа; *в* – отрезок палеореконструкции чисел Вольфа за последние ~3000 лет после обработки ФСС; *г* – его ВЧ-спектр; *д* – отрезок ряда логарифма толщины донных отложений на шельфе Пакистана за последние ~2040 лет после обработки ФСС; *е* – его ВЧ-спектр

кого (около 30° ю. ш.) и низкого (около 20–30° с. ш.) давления. Из рис. 9, *a* видно, что в период 1955–1965 гг. (“зима” данного цикла) область низкого давления образует широкую полосу от Западной Африки до Юго-Восточной Азии, распространяясь на юг примерно до 10° ю. ш., и практически достигает северной оконечности о-ва Мадагаскар. Характерный индикатор процесса на рисунке – положение изобар 1009–1011 гПа. Этот период можно соотнести с отрицательной фазой IOD.

В период 1990–2001 гг. (“лето” исследуемого цикла), напротив, усиливается область высокого давления, распространяя свое влияние на север к экватору, особенно активно вдоль побережья Кении и Сомали (рис. 9, *б*). Область низкого давления ослабевает, разделяется на несколько локальных центров и в Аравийском море отступает к побережью Пакистана и Индии. Этот период можно соотнести с положительной фазой IOD.

Подобным образом, но менее масштабно, происходят изменения и в поле реанализа t_w в эти же периоды. Основную часть данного поля севернее 15° ю. ш. занимает вытянутая углом от Пакистана к побережью Танзании область с $t_w \approx 27–28$ °С (рис. 9, *з, д*). В 1955–1965 гг. условная граница этой области на западе проходит примерно между устьем р. Инд и г. Дар-Эс-Салам (рис. 9, *з*). У побережья Сомали, Аравийского п-ва, Пакистана, в Аденском и Оманском заливах располагается широкая (до ~800 км) полоса $t_w \leq 26$ °С. При этом заметна связанная с Сомалийским течением область апвеллинга у Аравийского побережья.

В период 1990–2001 гг. в наиболее теплой части поля появляются участки с $t_w \geq 29$ °С (рис. 9, *д*). Область значений $t_w = 27$ °С опускается до 15° ю. ш. и входит в Мозамбикский пролив. Полоса более холодных вод, связанных с Сомалийским течением, заметно сокращается в размерах. Из рис. 9, *з, д* видно, что основные измене-

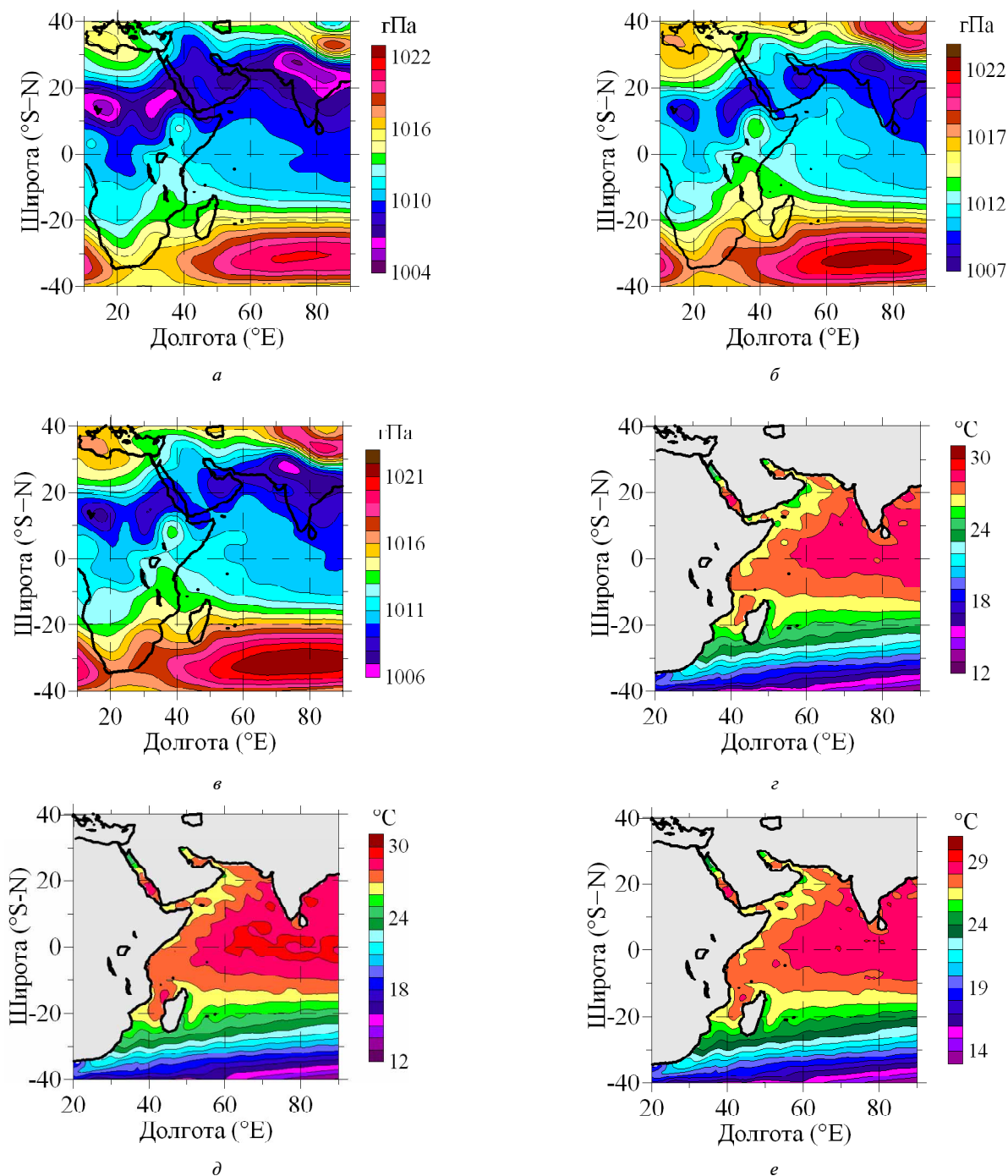


Рис. 9. Поля средних годовых значений атмосферного давления (гПа) и температуры воды (°C) в поверхностном слое Индийского океана по данным реанализа соответственно за 1955–1965 (а, с) и 1990–2001 (б, д), а также 1949–2009 гг. (е, е)

ния в поле t_w , в отличие от поля атмосферного давления, происходят севернее 15° ю. ш. В этом случае характерное положение имеет изотерма 25°C . В среднем же (за 1949–2009 гг.) географическое расположение и размеры этих основных областей давления и температуры воды остаются устойчивыми (рис. 9, в, е), а вариации в соответствии с фазами циклов происходят относительно средних характеристик.

Вместе с тем известно, что заметные различия в пространственно-временной реализации одних и тех же фаз как исследованного, так и

других междекадных колебаний характерны для рядов и полей всех контролируемых в науках о Земле параметров. Согласно нашим данным и данным работ, приведенных в списке литературы, регион Индийского океана в этом отношении не является исключением. Можно предположить, что образование и пространственная динамика указанных выше локальных областей, например в поле атмосферного давления, равно как и ритмодинамика временных рядов, связаны и во многом являются следствием существования общепланетарного поля ортогональных стоя-

чих и бегущих волн (ОВП) этого параметра и изменений, происходящих в нем на межгодовых масштабах в зависимости от фаз доминирующих циклов [4, 47, 51].

В дальнейшем можно попробовать связать области устойчивых аномалий, например, атмосферного давления (в том числе ЦДА) со стоячими волнами ОВП, а временные аномалии — с его бегущими волнами. То же можно выполнить и в отношении уже известного в настоящее время множества различных дипольных структур в атмосфере и в океане, включая ИОД. При этом степень вклада ОВП в формирование этих объектов исследований еще только предстоит оценить.

Выводы. Характерными пространственными масштабами для основных воздействий, существенно изменяющих режим муссонной области Индийского океана в междекадном диапазоне изменчивости, в первом приближении можно считать масштабы не менее 5000–7000 км.

Ведущую роль в изменчивости режима муссонной циркуляции муссонной области Индийского океана на протяжении последних двух столетий играет квазипериодическое колебание с периодом, близким к 60 годам. Положительный полупериод этого колебания, видимо, завершится в ближайшие 5–7 лет, после чего для Аравийского моря примерно на 25–30 лет должен установиться режим отрицательной фазы индекса ИОД с умеренным повышением его биопродуктивности и другими известными последствиями.

Данный цикл является сложным композиционным сигналом вследствие сочетания нескольких групп колебаний с близкими частотами в диапазонах примерно 42–46, 55–65 и 70 лет, что приводит к его активной модуляции. Еще один результат такой композиционности — существенное различие в фазах ~60-летнего цикла для разных районов как Индийской подсистемы, так и Азиатского муссона в целом. Эти свойства исследованного сигнала устойчиво прослеживаются по разным типам данных палеорекоstructions на протяжении последних 2000–5000 лет.

Кроме группы ~60-летнего колебания на межгодовых масштабах действуют еще, по крайней мере, две значимые группы ВЧ-колебаний с периодами ~9–15 и 20–30 лет на фоне более НЧ-циклов с периодами ≥ 100 лет. Особенности их пространственно-временного сочетания пока недостаточно изучены. Поэтому второе положение выводов в его прогностической части нуждается в уточнении и дополнительных исследованиях.

1. Артеха С.Н. О связи крупномасштабных вихревых атмосферных процессов с электромагнитными явлениями / С.Н. Артеха, Н.С. Ерохин // Электромагнитные явления. — 2005. — Т. 5, № 1 (14). — С. 3–20.
2. Белов С.В. О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью /

- С.В. Белов, И.П. Шестопалов, Е.П. Харин // Докл. РАН. — 2009. — Т. 428, № 1. — С. 104–108.
3. Владимиров В.С. Р-адический анализ и математическая физика / В.С. Владимиров, И.В. Волович, Е.И. Зеленев. — М.: Наука, 1994. — 352 с.
4. Еремеев В.Н. Исследование волновых свойств пространственной изменчивости температуры поверхности Атлантики на межгодовых масштабах / В.Н. Еремеев, А.Н. Жуков, А.А. Сизов // Исследование Земли из космоса. — 2012. — № 3. — С. 12–23.
5. Еремеев В.Н. Исследование особенностей ритмодинамики межгодовой изменчивости гидрометеорологических и гидрологических процессов в прибрежных зонах / В.Н. Еремеев, А.Н. Жуков, А.А. Сизов // Докл. РАН. — 2006. — Т. 409, № 2. — С. 524–527.
6. Еремеев В.Н. Фрактально-волновые свойства межгодовых колебаний температуры воздуха региональных и глобальной климатических систем / В.Н. Еремеев, А.Н. Жуков, А.А. Сизов // Геоинформатика. — 2010. — № 4. — С. 77–84.
7. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева и др.; Под ред. О.А. Дроздова, Н.В. Кобышевой. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 568 с.
8. Кляшторин Л.Б. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности / Л.Б. Кляшторин, А.А. Любушин. — М.: ВНИРО, 2007. — 224 с.
9. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл.: Пер. с англ. О. И. Хабарова и Г. А. Сидоровой. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
10. Монин А.С. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы / А.С. Монин, Д.М. Сонечкин. — М.: Наука, 2005. — 191 с.
11. Нейман В.Г. Динамика вод Индийского океана / В.Г. Нейман, В.А. Бурков, А.Д. Щербинин — М.: Науч. мир, 1997. — 232 с.
12. Покровский О.М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследование Земли из космоса. — 2010. — № 5. — С. 11–24.
13. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. — Курс лекций. — Пермь: ПГТУ, 1998. — Ч.1. — 108 с.; Ч.2. — 136 с.
14. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. В.И. Ермашина. — М.: Недра, 1987. — 221 с.
15. Яковец Ю.В. Цикличность как всеобщее свойство природы / Ю.В. Яковец, А.Г. Гамбурцев // Вестн. РАН. — 1996. — Т. 66, № 8. — С. 729–735.
16. Abram N.J. Seasonal characteristics of the Indian Ocean Dipole during the Holocene epoch / N.J. Abram, M.K. Gagan, Z. Liu, W.S. Hantoro, M.T. McCulloch, B.W. Suwargadi // Nature. — 2007. — V. 445. — P. 299–302.
17. Agnihotri R. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium / R. Agnihotri, K. Dutta, R. Bhushan, B.L.K. Somayajulu // Earth and Plan. Sci. Lett. — 2002. — V. 198. — P. 521–527.
18. Akkemik U. Reconstruction (A.D. 1689–1994) of April–August precipitation in Southern part of Central Turkey / U. Akkemik, A. Aras // Int. J. Climatology. — 2005. — V. 25 (4). — P. 537–548.
19. An Z. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times / Z. An, J.E. Kutzbach, W.L. Prell, S.C. Porter // Nature. — 2001. — V. 411. — P. 62–66.
20. Anderson D.M. Increase in the Asian SW monsoon during the past four centuries / D.M. Anderson, J.T. Overpeck, A.K. Gupta // Science. — 2002. — V. 297, № 5581. — P. 596–599.

21. *Bard E.* Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides / E. Bard, G. Raisbeck, F. Yiou, J. Jouzel // *Tellus*. – 2000. – V. 52B. – P. 985–992.
22. *Baumgartner T.R.* Reconstruction of the history of Pacific sardine and Northern Pacific anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara basin / T.R. Baumgartner, A. Soutar, V. Ferreira – Bartrina // *CalCOFI (Calif. Coop. Fish. Investig.) Rep.* – 1992. – № 33. – P. 24–40.
23. *Berger W.H.* Decadal to millennial cyclicity in verves and turbidities from the Arabian Sea: hypothesis of tidal origin / W.H. Berger, U. von Rad // *Global and Planetary Change*. – 2002. – V. 34. – P. 313–325.
24. *Borgaonkar H.P.* Tree-ring chronologies from western Himalaya and their dendroclimatic potential / H.P. Borgaonkar, G.B. Pant, K. Rupa Kumar // *IAWA J.* – 1999. – V. 20. – P. 295–307.
25. *Braconnot P.* Synergistic feedbacks from ocean and vegetation on the African monsoon response to mid-Holocene insolation / P. Braconnot, S. Joussaume, O. Marti, N. de Noblet // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – V. 26. – P. 2481–2484.
26. *Buehring C.* East Asian monsoon variability on orbital- and millennial-to-subdecadal time scales // Ph.D. Thesis. – Kiel: Univ. of Kiel, 2001.
27. *Burns S.J.* A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman / S.J. Burns, D. Fleitmann, M. Mudelsee, Neff U., Matter A., Mangini A. A // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, № D20. – P. 4434–4443.
28. *Charles C.D.* Interaction between the ENSO and the Asian monsoon in a coral record of Tropical climate / C.D. Charles, D.E. Hunter, R.G. Fairbanks // *Science*. – 1997. – V. 277. – P. 925–928.
29. *Cole J.E.* Tropical Pacific forcing of decadal variability in the western Indian Ocean over the past two centuries / J.E. Cole, R.B. Dunbar, T.R. McClanahan, N. Muthiga // *Ibid.* – 2000. – V. 287. – P. 617–619.
30. *Eremeev V.N.* Interannual fluctuations of the atmospheric pressure, sea surface temperature, and chlorophyll-a of the Arabian Sea / V.N. Eremeev, A.N. Jukov, N.E. Lebedev, S.A. Piontkovski, A.A. Sizov // *Int. J. Oceans and Oceanography*. – 2012. – V. 6, № 2. – P. 83–93.
31. *Felis T.* A coral oxygen isotope record from the northern Red Sea documenting NAO, ENSO, and North Pacific teleconnections on Middle East climate variability since the year 1750 / T. Felis, J. Petzold, Y. Loya, M. Fine, A.H. Nawar, G. Wefer // *Paleoceanography*. – 2000. – V. 15. – P. 679–694.
32. *Goswami B.N.* The Asian monsoon: interdecadal variability // The Global Monsoon system: research and forecast. Rep. of the Intern. Comm. of the Third Intern. Workshop on Monsoons (IWM-III), 2–6 Nov. 2004, Hangzhou, China. Tropical Meteorology Research Programme (TMRP), Rep. № 70. – Hangzhou, 2004. – P. 47–71.
33. *Heiss G.A.* Coral reefs in the Red Sea: growth, production and stable isotopes // *GEOMAR Report*. – 1994. – V. 32. – P. 1–141.
34. *Holmgren K.A.* 3000-year high-resolution record of palaeoclimate for North-Eastern South Africa / K. Holmgren, W. Karlin, S.E. Lauritzen et al. // *The Holocene*. – 1999. – V. 9, N 3. – P. 295–309.
35. *Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science*. – 1995. – V. 269. – P. 676–679.
36. *Kay S.M.* Modern spectral estimation. Theory and application. – New York: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1988. – 543 p.
37. *Kuhnert H.* A 200-year coral stable oxygen isotope record from a high-latitude reef off Western Australia / H. Kuhnert, J. Petzold, B. Hatcher et al. // *Coral Reefs*. – 1999. – V. 18. – P. 1–12.
38. *Kuhnert H.* Monitoring climate variability over the past 116 years in coral oxygen isotopes from Ningaloo Reef, Western Australia / H. Kuhnert, J. Petzold, K.-H. Wyrwoll, G. Wefer // *Int. J. Earth Sci.* – 2000. – V. 88. – P. 725–732.
39. *Li T.* A Theory for the Indian Ocean dipole – zonal mode / T. Li, B. Wang, C.-P. Chang et al. // *J. Atmosph. Sci.* – 2003. – V. 60, N 17. – P. 2119–2135.
40. *Loehle C.* Climate change attribution using empirical decomposition of climatic data / C. Loehle, N. Scafetta // *The Open Atmosph. Sci. J.* – 2011. – V. 5. – P. 74–86.
41. *Mazzarella A.* The 60-year solar modulation of global air temperature: The Earths rotation and atmospheric circulation connection // *Theor. Appl. Climatol.* – 2007. – V. 88. – P. 193–199.
42. *Mehta V.M.* Influence of solar irradiance on the Indian monsoon – ENSO relationship at decadal-multidecadal time scales / V.M. Mehta, K.M. Lau // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24. – P. 159–162.
43. *Schlesinger M.E.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years / M.E. Schlesinger, N. Ramankutty // *Nature*. – 1994. – V. 367, N 6465. – P. 723–726.
44. *Schneider U.* Global precipitation analysis products of the GPCC / U. Schneider, A. Becker, A. Meyer-Christoffer et al. // GPCC, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., Germany, Dec. – 2010.
45. *Solanki S.K.* An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years / S.K. Solanki, I.G. Usoskin, B. Kromer, et al. // *Nature*. – 2004. – V. 431, N. 7012. – P. 1084–1087.
46. *Thompson L.G.* Kilimanjaro ice core records: evidence of Holocene climate change in Tropical Africa / L.G. Thompson, E. Mosley-Thompson, M. Davis et al. // *Science*. – 2002. – V. 298. – P. 589–593.
47. *Tourre Y.M.* Global climate signals and equatorial SST variability in the Indian, Pacific and Atlantic oceans during the 20th century / Y.M. Tourre, W. White // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – V. 33. – L06716.
48. *Tsiropoula G.* Signatures of solar activity variability in meteorological parameters // *J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics*. – 2003. – V. 65. – P. 469–482.
49. *Vernekar A.D.* The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon / A.D. Vernekar, J. Zhou, J. Shukla // *J. Climate*. – 1995. – V. 8. – P. 248–266.
50. *Wang P.S.* Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues / P.S. Wang, L. Clemens, P. Beaufort et al. // *Quaternary Sci. Rev.* – 2005. – V. 24. – P. 595–629.
51. *White W.B.* Global SST/SLP waves during the 20th century / W.B. White, Y.M. Tourre // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30, N 12. – P. 53–1 – 53–4.

¹Океанологический центр НАН Украины, Севастополь, Украина

²Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, Украина
E-mail: nick_leb@mail.ru

© В.Н. Еремеев, А.Н. Жуков, Н.Е. Лебедев, А.А. Сизов
ISSN 1684-2189 ГЕОИНФОРМАТИКА, 2013, № 3 (47)

Поступила в редакцию 05.06.2013 г.

КВАЗИШЕСТИДЕСЯТИРІЧНИЙ ЦИКЛ МУСОННОЇ ОБЛАСТІ ІНДІЙСЬКОГО ОКЕАНУ

За даними реаналізу, стаціонарних вимірювань у межах останніх 60–100 років і палеорекострукцій досліджено просторово-часовий розподіл ~60-річного коливання для частини гідрометеорологічних, гідрофізичних і геофізичних параметрів Аравійського моря та Індійського океану. На цій підставі розглянуто домінуючі нині кліматичні тенденції мінливості зазначених параметрів для різних частин регіону та особливості їх спектральних структур.

Ключові слова: мусон Індійського океану, дані реаналізу та стаціонарних вимірювань, палеорекострукції, міждекадна мінливість, ~60-річний цикл.

V.N. Eremeev, A.N. Jukov, N.E. Lebedev, A.A. Sizov

A QUASI-60 YEAR CYCLE OF MONSOON REGION OF THE INDIAN OCEAN

A spatial and temporal distribution of a ~60-year oscillation for some hydrometeorological, hydrophysical and hydrobiological parameters of the Arabian Sea and Indian Ocean have been studied, based on re-analysis data, long-term stationary data measurements and paleo reconstructions. The authors describe particularities of these parameters variations for different parts of this region and of their spectral structures.

Keywords: Indian ocean monsoon, data of re-analysis and steady-state measurements; paleo reconstructions, interdecadal variability, 60-year cycle.