



УДК 551.46(267)+551.585.3+551.583.13+519.246.8

Академик НАН Украины **В. Н. Еремеев, А. Н. Жуков, Н. Е. Лебедев, А. А. Сизов**

Исследование климатических тенденций Аравийского моря

По данным ре-анализа, результатов многолетних стационарных измерений и палеоре-конструкций исследовано пространственно-временное распределение ~60-летнего колебания гидрометеорологических, гидрофизических и гидробиологических параметров Аравийского моря и Индийского океана. Выявлена его ведущая роль в изменчивости режима муссонной циркуляции Индийского океана на протяжении последних двух столетий. Показаны особенности изменчивости указанных параметров и их спектральных структур для разных частей региона.

Недостаток данных контактных измерений по Аравийскому морю на масштабах десяти-летий приводит к заметным различиям в оценках климатических тенденций межгодовых колебаний его различных параметров [1, 2]. В публикации [3] было показано, что за исследованный в этой работе период 1985–2008 гг. величины межгодовых колебаний атмосферного давления, температуры воды и концентрации хлорофилла “а” в поверхностном слое Аравийского моря в основном не выходили за пределы их средних климатических вариаций последних 30–40 лет. Там же был сделан предварительный вывод, что основные воздействия, существенно меняющие режим муссонной циркуляции Аравийского моря, связаны не только с большими, чем размеры моря, масштабами по пространству (5000–8000 км), но и с большими, чем исследованный период, масштабами по времени (40–60 и более лет). Основную роль в такой изменчивости в пределах столетия играет ~60-летнее колебание.

Цель настоящего сообщения — проверка этого предположения на наиболее протяженных по времени рядах из массивов ре-анализа и стационарных измерений параметров атмосферы и гидросферы, а также отдельных палеоре-конструкциях Аравийского моря и Индийского океана. Аналитическая основа работы — ритмодинамический (резонансно-волновой) подход [4]. В нем для описания изменчивости природных процессов используется модель полифонического, фрактально-волнового вибратора.

© В. Н. Еремеев, А. Н. Жуков, Н. Е. Лебедев, А. А. Сизов, 2013

Такую полифоническую систему колебаний с их фрактальными свойствами можно рассматривать как средство передачи (трансформации) энергии и взаимодействий между разными масштабами изменчивости; ~ 60 -летнее колебание является существенной частью этого фрактально-волнового механизма в планетарных масштабах. Поиск колебаний осуществлялся посредством преобразования Фурье, а их выделение — цифровыми низкочастотными и полосовыми фильтрами скользящего среднего (ФСС и ПФСС соответственно).

Использованные в работе среднемесячные данные стационарных измерений атмосферного давления ($P_{\text{атм}}$, гПа), температуры атмосферы в приземном слое ($t_{\text{атм}}$, °C) и осадков (R , мм) были взяты из базы NCDC (<http://dss.ucar.edu/datasets/-ds570.0>). Источником аналогичных данных по уровню моря (SSH) (η , мм) была база данных PSMSL (<http://www.psmsl.org/>). Также были использованы массивы ре-анализа среднемесячных значений $P_{\text{атм}}$ (<http://index-of/pub/reanalysis-1/month/grb2d.lola/>), $t_{\text{атм}}$ за 1948–2007 гг., t_w , °C (воды), U , V , м/с (скорости ветра) из базы NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis-/reanalysis.shtml>), осадков GPCC (<http://gpcc.dwd.de>).

С учетом результатов [3], для анализа был выбран фрагмент поверхности в пределах $40,0^\circ$ с. ш. — $40,0^\circ$ ю. ш., $20,0$ – $90,0^\circ$ в. д. Для осреднения временных рядов массивов ре-анализа использовались четверти выбранного фрагмента — северо-запад (СЗ), северо-восток (СВ), юго-запад (ЮЗ) и юго-восток (ЮВ) с границами между севером и югом по 0° с. ш., западом и востоком — по 59° в. д.

Для анализа были использованы ряды палеорекоkonструкций по содержанию изотопа ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) в коралловых рифах из баз данных World Data Center A — Paleoclimatology (<http://medias.obs-mip.fr/paleo/datalist.html#coral>) в Малинди (Кения) и на о. Маэ (Сейшельские острова), побережье западной Австралии — Нингаллоо и скалы Хаутмен, в Акаба (Иордания) и Рас-Умм-Сидд (Египет) — на северо-западе Красного моря.

Запад и северо-восток Аравийского моря представляют ряды донных отложений фораминифер *Globigerina bulloides* (Оман) в процентах относительно всех других видов фораминифер (ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/-paleo/contributions_by_author/anderson2002/anderson2002.txt) и ряды логарифма толщины годовых слоев донных отложений на шельфе Пакистана.

Из базы данных World Data Center A были получены дендрохронологические данные (<http://medias.obs-mip.fr/paleo/ftp-treering.html>) в виде толщины годовых колец деревьев (мм) для района г. Симла (Индия) и городов Аквиран и Эфляни (Турция). Аналогичные ряды по годовым кольцам деревьев в Австралии (о. Тасмания) и Индии (Кашмир, Гималаи) были взяты из Time Series Data Library by R. Hyndman and M. Akram (<http://robjhyndman.com/TSDL/tree-rings/>). В качестве наиболее длинной реконструкции использован ряд содержания ^{18}O в кернах ледника горы Килиманджаро (Танзания) за 450–1950 гг. [5].

Ряды ре-анализа были обработаны ПФСС в диапазоне 20–30 лет и сглажены ФСС длиной 10 лет. На рис. 1 показана часть кривых, осредненных для приведенных выше четвертей исследуемого фрагмента. По полученным результатам видно, что основная роль в низкочастотной (НЧ) области исследованных величин принадлежит 60–70-летним квазипериодическим колебаниям. Есть определенная разница в фазах и периодах этих колебаний у разных параметров и в различных четвертях исследуемого фрагмента. Росту атмосферного давления, температуры воздуха и воды в этот период сопутствует снижение модуля скорости ветра для всех четвертей, кроме юго-восточной.

Для обеих температурных кривых, также как и для низкочастотных составляющих рядов скорости ветра (см. б на рис. 1) и количества осадков, заметно наличие другого коле-

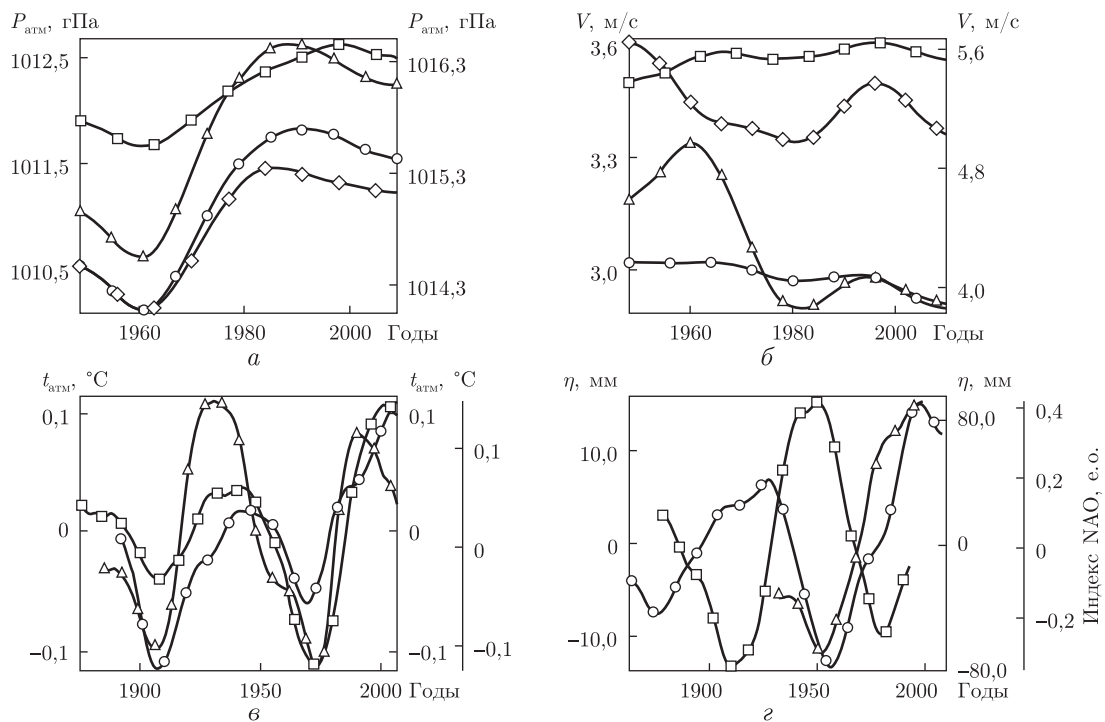


Рис. 1. НЧ-составляющие рядов среднегодовых значений (ре-анализ) атмосферного давления (*а*), модуля скорости ветра (*б*) для СЗ (Δ), СВ (\circ) (левая ось Y), ЮЗ (\diamond) и ЮВ (\square) (правая ось Y) четвертой исследуемого фрагмента. НЧ-составляющие рядов среднегодовых значений (NCDC) температуры воздуха для Порт-Элизабет (Δ), Лахора (\square) (1-я правая ось Y) и Тируванантапурама (\circ) (2-я правая ось Y) (*в*) и уровня моря (PSMSL) для Мумбаи (\square), Калькутты (Δ) (1-я правая ось Y), а также индекса NAO (\circ) (*з*)

бания с периодом ~ 30 лет. Практически во всех полученных спектрах, помимо ~ 60 -летней гармонике, заметны еще две группы гармоник 10–15 и 3–5 лет.

Аналогичные примеры для температуры воздуха в Порт-Элизабет (ЮАР), Лахоре и Тируванантапураме (Индия) приведены по данным NCDC (см. *в* на рис. 1). Длина этих рядов близка к полутора периодам исследуемого колебания. Как видно, все три представленные кривые имеют хорошо выраженную форму, но с разными значениями амплитуд и фаз колебания до и после 50-х гг. прошлого столетия. Близкие результаты получены для рядов атмосферного давления и осадков.

Примеры НЧ-составляющих рядов среднегодовых значений уровня моря по данным PSMSL для Мумбаи и Калькутты (Индия) иллюстрирует рис. 1, *з*. Как видно, они представляют собой колебания с периодами 60–80 лет, причем находящиеся в противофазе. Изменения уровня моря в Мумбаи близки по фазе к Фремантлу (запад Австралии), а в Калькутте — к Легаспи (Филиппины). Там же представлена НЧ-составляющая ряда индекса NAO (<http://climatedataguide.ucar.edu/guidance/>), выделенная ПФСС в диапазоне 50–70 лет и сглаженная ФСС с периодом 15 лет.

Этот результат и другие [6–8] указывают на то, что климатические изменения в регионах Северной Атлантики, Черного и Аравийского морей по ~ 60 -летнему колебанию происходят преимущественно в одной фазе, а, например, с Бенгальским заливом — в противофазе. Описание возможного механизма, объясняющего такое явление дальних связей (teleconnections), дано ниже.

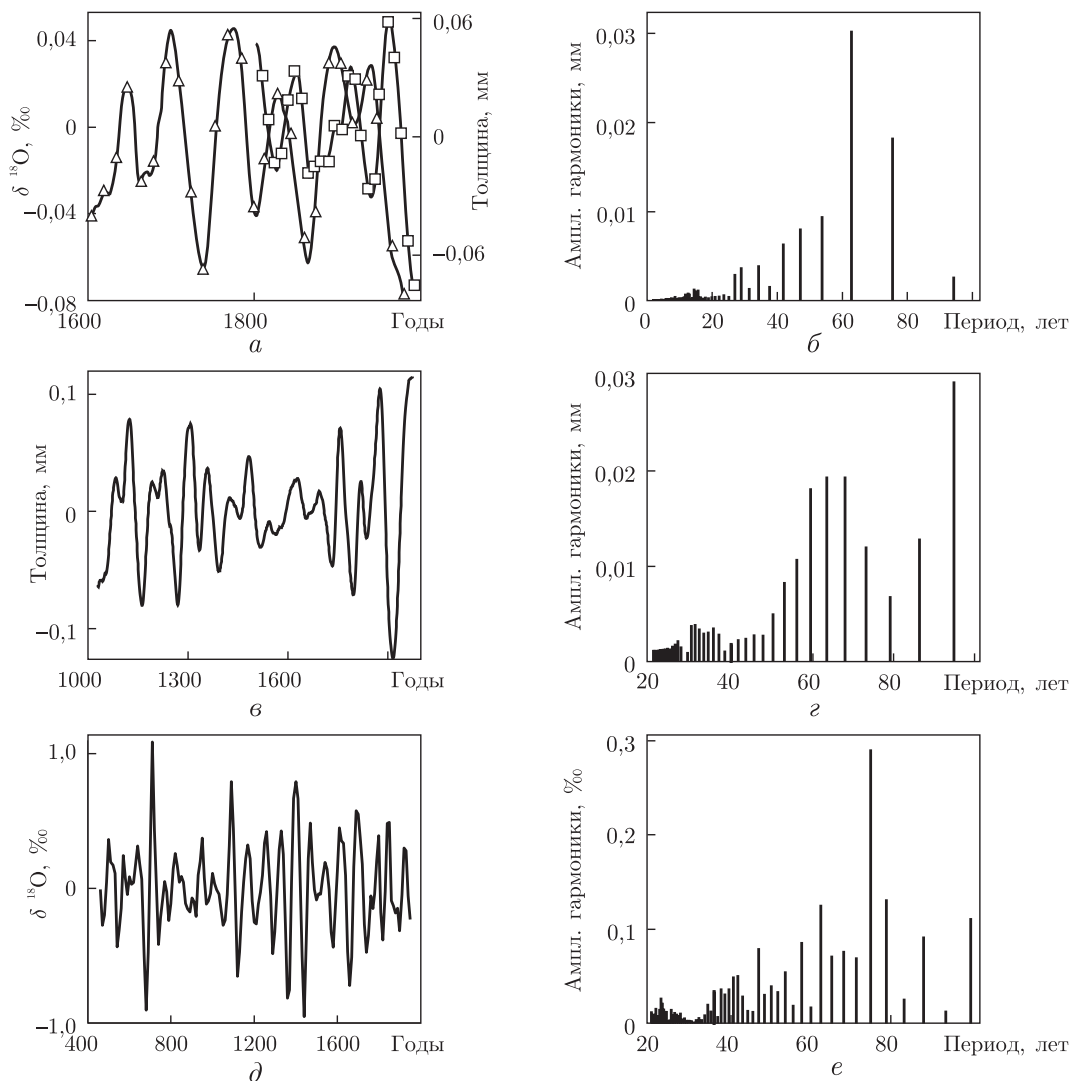


Рис. 2. ~ 60 -Летние составляющие после ФСС рядов палеореконовки содержания $\delta^{18}\text{O}$ в коралловых рифах в Малинди (\square) (ось Y слева) и по годовым кольцам деревьев в Кашмире (\triangle) (справа) (а), по годовым кольцам деревьев в Австралии (в), $\delta^{18}\text{O}$ в кернах ледника г. Килиманджаро (д) и их спектры (б — Кашмир)

Для изучения пространственно-временных особенностей действия ~ 60 -летнего цикла аналогичная процедура была проведена и над палеоклиматическими рядами. Для выделения в них этого цикла использовались последовательные сглаживания ФСС с периодами 25 лет и 10–15 лет. Примеры сглаженных рядов приведены на рис. 2, а, в, д, их спектры — на рис. 2, б, г, е. Как видно, в диапазоне от 40 до 70–80 лет действует не одно или два, а группа междекадных колебаний с достаточно близкими частотами. При этом между кривыми на рис. 2, а, в, д также наблюдаются заметные фазовые различия, которые на разных временных участках могут меняться в широких пределах от синфазности до противофазности.

Палеоклиматические ряды дают возможность увидеть амплитудную модуляцию ~ 60 -летнего колебания, как это показано в [9]. На рис. 2, в ~ 60 -летнее колебание выделено из ряда по годовым кольцам деревьев в Австралии из Time Series Data Library последо-

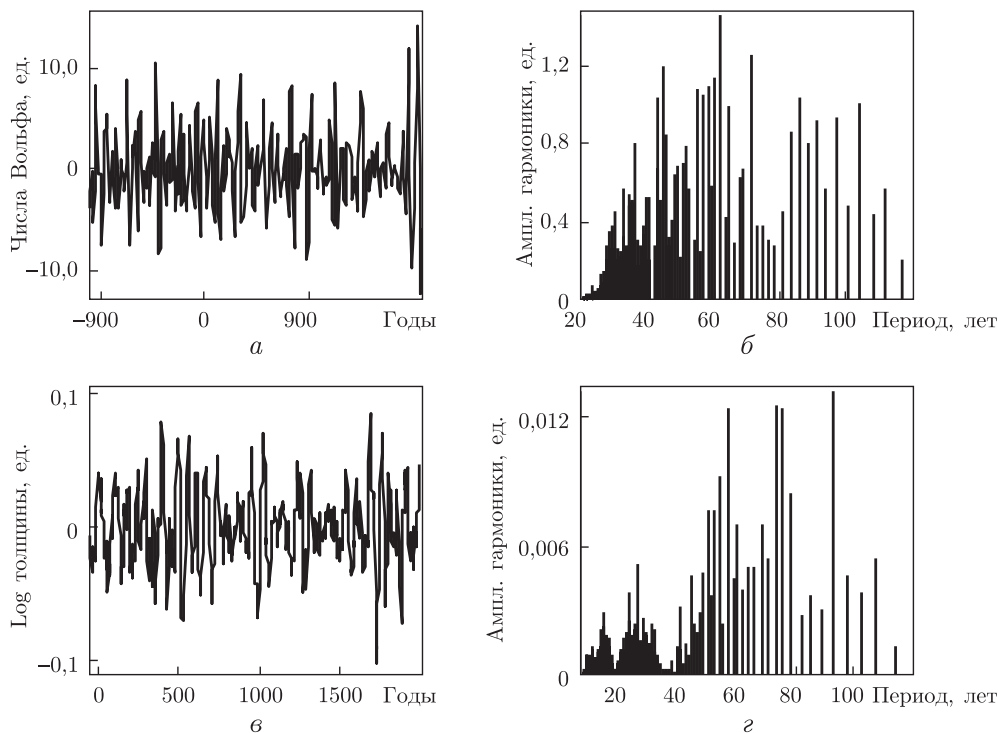


Рис. 3. Отрезок палеорекострукции чисел Вольфа за последние ~3000 лет после обработки ФСС (а) и высокочастотная часть его спектра (б); отрезок ряда логарифма толщины донных отложений на шельфе Пакистана за последние ~2040 лет после обработки ФСС (в) и высокочастотная часть его спектра (г)

вательно ПФСС диапазонами 400–700 и 40–80 лет, после чего сглажено ФСС с периодом 20 лет. Кривая (см. в на рис. 2) имеет двухстороннюю модуляцию и ее огибающая в сглаженном виде близка к колебанию с периодом 400–600 лет.

В спектре отфильтрованного посредством ФСС с периодами 400, 100 и 30 лет ряда ледника г. Килиманджаро (см. д на рис. 2) доминирует гармоника с периодом ~75 лет. Он также модулирован по амплитуде, т. е., как и исходный ряд г. Килиманджаро и большинство других климатических рядов, он, следуя терминологии [6], может быть назван композиционным или полифоническим.

Полученные результаты с учетом большой пространственной удаленности друг от друга пунктов наблюдений — побережья Африки, Австралии, предгорья Гималаев — указывают на общепланетарный характер выявленных колебаний. В статье [10] была показана связь ~60-летней изменчивости муссона с солнечной активностью. Но по другим публикациям, например в [11], видно, что наличие ~100-летнего и более НЧ-колебаний затрудняет обнаружение ~60-летней изменчивости в солнечной активности. Нами использован более длинный, чем в [11], ряд палеорекострукции чисел Вольфа за последние ~11000 лет [12]. Отрезок этого ряда (с 1000 г. до н. э. по 1895 г. н. э.) после последовательной обработки ФСС периодами 410, 110 и 50 лет иллюстрирует рис. 3. В его спектре (см. б на рис. 3) проявляются три группы доминант в диапазонах 42–46, 55–65, 70 и 80–90 лет. Последний диапазон относится к циклу Глейсберга. Более очевидный результат был получен после аналогичной обработки ряда донных отложений на шельфе Пакистана с 4509 г. до н. э. по 1950 г. н. э. (см. в). В его спектре доминанты находятся в диапазонах 50–60, 70–80 и 90–100 лет (см. г).

Заметные отличия в пространственно-временной реализации одних и тех же междекадных колебаний наблюдаются у всех геофизических параметров. Можно предположить, что образование и динамика таких локальных областей, например, в поле атмосферного давления, во многом являются следствием существования общепланетарного волнового поля (ОВП) ортогональных стоячих и бегущих волн и изменений, происходящих в нем на межгодовых масштабах в зависимости от фаз доминирующих циклов [6, 13].

Видимо, наиболее низкочастотные ячейки ОВП и образуют пространственные области синфазности или противофазности отдельных временных колебаний. Такая структура ОВП не статична, поскольку зависит от результатов суперпозиции бегущих волн. Это приводит к постоянным изменениям формы и положения областей одного фазового знака в виде колебаний относительно средних климатических величин [3].

Таким образом, согласно изложенным результатам исследований, можно утверждать следующее: ведущую роль в изменчивости режима циркуляции муссонной области Индийского океана в пределах последних двух столетий играет квазипериодическое колебание с периодом, близким к 60 годам; наличие в нем нескольких групп колебаний с близкими периодами в диапазонах 42–46, 55–65 и 70 лет приводит к его модуляции и, как следствие, к отличию фаз этого цикла в разных районах Индийского океана, причем эти свойства исследованного колебания устойчиво прослеживаются по разным типам данных палеореконокструкций на протяжении последних 2000–5000 лет; кроме ~60-летнего колебания, на межгодовых масштабах действует еще одна значимая группа колебаний с периодами менее 30 лет на фоне более низкочастотных с периодами ≥ 90 лет.

1. Goes J. I., Thoppil P. G., Gomes H. R. et al. Warming of the Eurasian landmass is making the Arabian sea more productive // *Science*. – 2005. – **308**, No 5721. – P. 545–547.
2. Vernekar A. D., Zhou J., Shukla J. The effects of Eurasian snow cover on the Indian monsoon // *J. Climate*. – 1995. – **8**. – P. 248–266.
3. Eremeev V. N., Jukov A. N., Lebedev N. E. et al. Interannual fluctuations of the atmospheric pressure, sea surface temperature, and chlorophyll-a of the Arabian Sea // *Inter. J. Oceans and Oceanography*. – 2012. – **6**, No 2. – P. 83–93.
4. Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Сизов А. А. Исследование особенностей ритмодинамики межгодовой изменчивости гидрометеорологических и гидрологических процессов в прибрежных зонах // *Докл. АН*. – 2006. – **409**, № 2. – С. 524–527.
5. Thompson L. G., Mosley-Thompson E., Davis M. E. et al. Kilimanjaro ice core records: evidence of Holocene climate change in Tropical Africa // *Science*. – 2002. – **298**. – P. 589–593.
6. Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Сизов А. А. Исследование волновых свойств пространственной изменчивости температуры поверхности Атлантики на межгодовых масштабах // *Исследование Земли из космоса*. – 2012. – № 3. – С. 12–23.
7. Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Крашенинникова М. А. и др. Волновые процессы в изменчивости поверхностной температуры Черного моря // *Докл. АН*. – 2012. – **443**, № 1. – С. 112–115.
8. Felis T., Pätzold J., Loya Y. et al. 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 // *Paleoceanography*. – 2000. – **15**. – P. 679–694.
9. Burns S. J., Fleitmann D., Mudelsee M. et al. A 780-year annually resolved record of Indian ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman // *J. Geophys. Res.* – 2002. – **107**, No D20. – P. 4434–4443.
10. Agnihotri R., Dutta K., Bhushan R. et al. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 2002. – **198**. – P. 521–527.
11. Bard E., Raisbeck G., Yiou F. et al. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides // *Tellus*. – 2000. – **52B**. – P. 985–992.
12. Solanki S. K., Usoskin I. G., Kromer B. et al. An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // *Nature*. – 2004. – **431**, No 7012. – P. 1084–1087.

13. *Toure Y. M., White W. B.* Global climate signals and equatorial SST variability in the Indian, Pacific and Atlantic oceans during the 20th century // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – **33**. – L06716.

*Океанологический центр НАН Украины, Севастополь
Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь*

Поступило в редакцию 23.05.2013

**Академік НАН України В. М. Єремєєв, О. М. Жуков, М. Є. Лебедєв,
А. О. Сизов**

Дослідження кліматичних тенденцій Аравійського моря

*За даними ре-аналізу, результатів багаторічних стаціонарних вимірювань і палеореко-
струкцій досліджено просторово-часовий розподіл ~60-річного коливання гідрометеороло-
гічних, гідрофізичних і гідробіологічних параметрів Аравійського моря та Індійського океа-
ну. Виявлено його провідну роль в мінливості режиму мусонної циркуляції Індійського океа-
ну протягом останніх двох століть. Показано особливості мінливості зазначених пара-
метрів та їх спектральних структур для різних частин регіону.*

**Academician of the NAS of Ukraine V. N. Eremeev, A. N. Zhukov, N. E. Lebedev,
A. A. Sizov**

Investigation of Arabian Sea's climatic trends

*According to the data of re-analysis, long-term stationary measurements, and paleo reconstructions,
the spatio-temporal distribution of ~60-year oscillation in hydrometeorological, hydrophysical, and
hydrobiological parameters of the Arabian Sea and the Indian Ocean is investigated. The leading
role of this oscillation in the variability of a monsoon circulation mode over the Indian Ocean for
last two centuries is found. The features of the variability of these parameters and their spectral
structures for different parts of the region are shown.*