

*Х. Фарджами, Б. Шапрон*

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВЕТРА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ NCEP/NCAR ЗА ПЕРИОД 2010–2014 ГГ.**

*H. Farjami, B. Chapron*

**SEA SURFACE WIND IN THE NORTH OF INDIAN OCEAN BY NCEP/NCAR DATA ANALYSIS (2010–2014)**

*В работе представлено исследование приводного ветра в северной части Индийского океана на основе данных реанализа NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction)/(National Center for Atmospheric Research) за период с 01.01.2010 до 30.05.2014. Анализ проведен отдельно для Аравийского моря и Бенгальского залива, обладающих принципиально разным ветровым режимом. Анализ пространственно – временной изменчивости поля ветра проведен с использованием метода эмпирических ортогональных функций. Показано, что для Аравийского моря вклад первой моды составляет 77,5 %, а второй моды – 5,5 % от полной дисперсии пространственной изменчивости поля ветра. Для Бенгальского залива первая мода содержит 64,5 %, а вторая мода 11,7 % полной дисперсии. Собственные векторы временного ряда показывают сезонную, годовую модуляцию приповерхностного ветра в Аравийском море и в Бенгальском заливе.*

*Ключевые слова: Индийский океан, приповерхностный ветер, эмпирические ортогональные функции.*

*The present study investigates sea surface wind in the North part of Indian Ocean based on daily reanalysis NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction)/(National Center for Atmospheric Research) data in the period from 01.01.2010 to 30.05.2014. The analysis has been performed separately in the Arabian Sea and in the Bay of Bengal. Principally these regions have different wind regimes. For analyses combine a spatial variance and temporal variance modes, empirical orthogonal functions are used to identify patterns of surface wind in the North of Indian Ocean. The Results of this study shows for the Arabian Sea the first mode, 77,5 % and the second mode, 5,5 % of the total spatial variance pattern of surface wind and For the Bay of Bengal these values are 64,5 % and 11,7 % respectively. Furthermore, the eigenvector time series illustrate a seasonal, annual modulation of surface wind in the Arabian Sea and in the Bay of Bengal.*

*Key words: Indian Ocean, sea surface wind, empirical orthogonal functions.*

***Введение***

Ветровой режим северной части Индийского океана определяется главным образом пассатами и муссонами, которые являются главным фактором образования тропических циклонов [12]. Пассаты — это устойчивые воздушные течения над акваторией океанов в тропических широтах преимущественно с северо-восточным направлением в

северном полушарии и юго-восточным в южном. Муссоны — также постоянные ветры, однако их характерной особенностью является сезонное изменение направления ветра и их влияние на океанические течения и волны в Северном полушарии.

В настоящее время такие геофизические параметры, как скорость и направление ветра, могут быть восстановлены из данных дистанционного спутникового зондирования специальными алгоритмами [2] и использованы, в том числе, для анализа экстремальных погодных явлений [1]. Рашми и др. (2014) провели спектральный анализ ветра на всей акватории Индийского океана, разделенного на 6 частей, с использованием авто-регрессионного анализа на основе Yule-Walker уравнений. В результате было показано, что ветровой режим разных районов Индийского океана является независимым, а диапазоны частот изменчивости ветра увеличиваются от северной части к южной [9]. В работе Бхаскаран и др. (2014) было исследовано влияние изменчивости климата на максимальные высоты волн и скорости ветра на основе данных спутниковых наблюдений [4]. В работе Гледжин и др. (2013) было исследовано влияние ветра на поле поверхностного волнения в Аравийском море на основе данных реанализа NCEP/NCAR и данных визуальных наблюдений [8]. Исследование ветрового режима западной тропической части Индийского океана на основе спутниковых скаттерометрических измерений и данных реанализа проведено в работе [6]. Межсезонная, межгодовая и климатическая изменчивость поля ветра в Индийском океане проанализирована в работе Счот и др. [10].

Данная работа посвящена изучению поля приповерхностного ветра в северной части Индийского океана на основе данных реанализа NCEP/NCAR. Работа разделена на две части:

- исследование поля приводного ветра в северной части Индийского океана;
- исследование поля приводного ветра в Аравийском море и Бенгальском заливе с использованием метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), создание модели изменчивости временных рядов в период с 01.01.2010 до 30.05.2014.

### *Данные и методы*

В работе использовались среднесуточные данные по скорости и направлению приводного ветра в период с января 2010 г. до марта 2014 г., являющиеся продуктом NCEP/NCAR реанализа (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>).

Эффективным инструментом статистического анализа данных измерений в океанографии и метеорологии являются так называемые эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Преимущество ЭОФ анализа заключается в том, что он обеспечивает компактное описание пространственной и временной изменчивости геофизических полей в терминах ортогональных функций, или статистических мод. Следует подчеркнуть, что между статистическим ЭОФ анализом и гидро-динамическими моделями не всегда существуют прямые физико-математические связи [7].

ЭОФ является инструментом, который позволяет разложить исходное поле мод, доминирующих во времени и пространстве. В нашем случае, метод ЭОФ применялся для анализа полей ветра  $F$ , который представлялся в виде матрицы размером  $M \times N$ :

$$F = \begin{matrix} & \rightarrow Time \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{np} \end{bmatrix} & \downarrow Location \end{matrix}$$

Данные  $F$  используются для получения пространственной ковариационной матрицы  $R$  поля  $F$  путем умножения матрицы  $F$  на транспонированную матрицу  $F^\dagger$ :

$$R = FF^\dagger \tag{1}$$

После того, как ковариационная матрица рассчитана, переходим к поиску собственных векторов матрицы  $\Lambda$  и  $C$ :

$$RC = C\Lambda \tag{2}$$

$\Lambda$ -диагональная матрица, содержащая собственные значения  $\lambda_j$  для  $R$ , вектор-столбцы  $c_j$  матрицы  $C$  являются собственными векторами  $R$ , соответствующих собственным чисел. Каждый из этих собственных векторов является ЭОФ;  $n$  компоненты вектора  $\vec{a}_1$  являются проекциями карты в  $F$  на ЭОФ $_1$ , и вектор является временным рядом для эволюции ЭОФ $_1$ .

В общем, для каждого рассчитанного ЭОФ $_j$  мы можем найти соответствующую  $\vec{a}_j$ . Мы можем восстановить данные с ЭОФ и коэффициенты разложения следующим образом [5]:

$$F = \sum_{j=1}^p \vec{a}_j \text{ЭОФ}_j, \tag{3}$$

где  $\vec{a}_j$  — временная изменчивость; ЭОФ $_j$  — пространственная изменчивость.

**Результаты**

Данные NCEP/NCAR были проанализированы с целью исследования внутри-годовой изменчивости поля ветра в северной части Индийского океана. В качестве примера на рис. 1 показаны скорость и направление поля приводного ветра в северной части Индийского океана в зимний и летний периоды.

Этот рисунок иллюстрирует основную особенность ветрового режима в исследуемом районе — существование муссонов, возникновение которых связано с повышенным давлением над Азиатским материком зимой (северо-восточный муссон) и пониженным — летом (юго-западный).

Обобщение данных направления ветра в северной части Индийского океана на основе NCEP/NCAR анализа в период 2008–2014 гг. представлено в табл. 1.

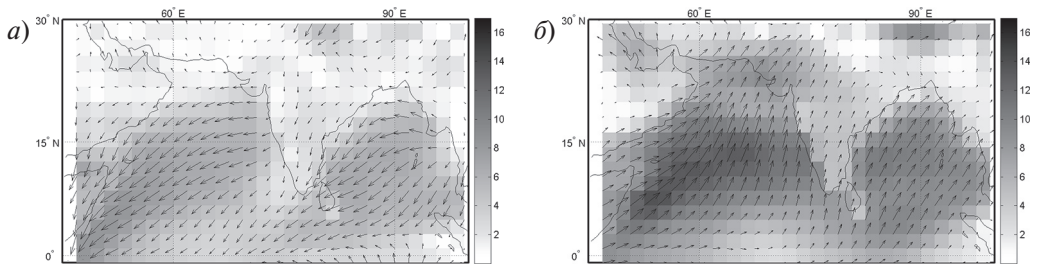


Рис. 1. Скорость и направление приводного ветра над акваторией северной части Индийского океана, 1 января 2010 г. (а), 1 июня 2010 г. (б), NCEP/NCAR

Таблица 1

**Режим скоростей ветра над Аравийским морем и Бенгальским заливом  
в период с 2008 до 2014 г., NCEP/NCAR**

Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.	
СВ (зимний муссон)			Ю-ЮВ-ЮЗ (слабый)		ЮЗ-Ю		ЮЗ (летний муссон)		ЮЗ-Ю	Ю-ЮЗ (слабый)	Ю-СВ	СВ-Ю (слабый)

В соответствии с табл. 1 зимний муссон преобладает с ноября по март, в то время как летний муссон — с июня по октябрь. Переход от зимнего муссона к летнему наблюдается в апреле — мае, и от летнего к зимнему в октябре. Изменчивость океанологических параметров на акватории Индийского океана обусловлена изменениями активности муссонов. Известно, что ослабление (в климатическом масштабе) зимнего муссона ведёт к повышению температуры воды, уменьшению глубины конвекции, росту концентрации биогенных элементов и снижению содержания кислорода в глубинных слоях моря. Значимых трендов активности летнего муссона в климатическом масштабе не выявлено, но отмечены междесятилетние флуктуации его активности, при этом ослабление летнего муссона ведёт к росту температуры на поверхности моря, уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания, уменьшению толщины верхнего квазиоднородного слоя моря (ВКС), уменьшению количества осадков [3]. Взаимодействие океана и атмосферы над Аравийским морем считается одним из важных факторов в объяснении муссонной циркуляции и связанных норм осадков над Индией [11].

Рассмотрим теперь отдельно особенности поля ветра в Аравийском море и Бенгальском заливе. На рис. 2 показано поле средней скорости ветра в Аравийском море и Бенгальском заливе, полученное путем усреднения ежедневных полей ветра по данным NCEP/NCAR за период 2010–2014 гг.

Средняя скорость ветра (рис. 2) достигает максимальных значений вблизи Аравийского континента и в центральной части акватории Бенгальского залива. Отклонение полей ветра от средних значений в Аравийском море и Бенгальском заливе было исследовано с использованием метода ЭОФ. На рис. 3 показаны амплитуды собственных значений ЭОФ в Аравийском море и в Бенгальском заливе соответственно.

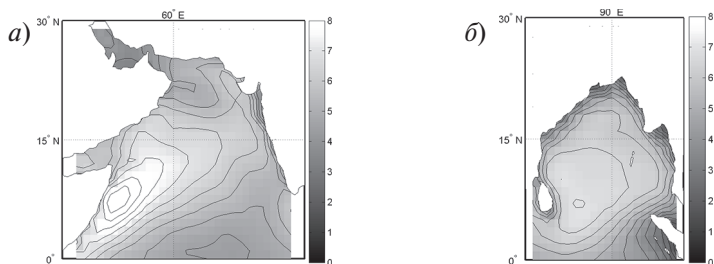


Рис. 2. Средняя скорость ветра (м/с) над акваторией Аравийского моря (а) и Бенгальского залива (б), 2010–2014 гг., NCEP/NCAR

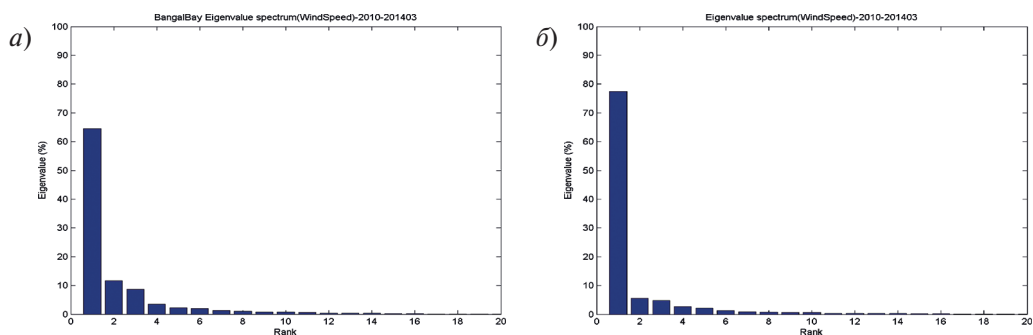


Рис. 3. Амплитуды временной изменчивости ЭОФ для различных мод для Аравийского моря (а) и Бенгальского залива (б), оцененные по данным NCEP/NCAR за период 2010–2014 гг.

Как видно из рис. 3, для обоих бассейнов первая мода значительно доминирует по сравнению с последующими. В Аравийском море первая и вторая моды содержат 77,5 % и 5,5 % полной дисперсии временной изменчивости соответственно. В Бенгальском заливе вклады первой и второй моды составляют 64,5 % и 11,7 %.

На рис. 4 представлены первая и вторая пространственные (рис. 4а, в) и временные (рис. 4б, г) ЭОФ моды изменчивости скорости ветра.

В соответствии с первой модой самая интенсивная изменчивость скорости приводного ветра приходится на юго-западную часть Аравийского моря (рис. 4а), а вторая мода демонстрирует самую интенсивную изменчивость скорости приводного ветра в центре, в юго-западной части и вдоль Персидского залива (рис. 4в). Модальные амплитуды (рис. 4б, г) показывают временной ряд мод, в котором вторая мода имеет более слабый сигнал, чем первая мода. Первая мода имеет тенденцию к положительным значениям в зимний период и к отрицательным значениям в летний. Функции модальных амплитуд показывают межгодовой цикл (рис. 4б). Вторая мода представляет цикл менее заметных периодических колебаний в межсезонный период (рис. 4г). Следовательно, изменчивость временного анализа с помощью ЭОФ метода показывает годовой цикл для скорости ветра в Аравийском море. Анализ с использованием ЭОФ предоставляет больше информации об особенностях поля ветра (по сравнению со

средними полями), так как первая мода ЭОФ, наряду с пространственным распределением ветра, демонстрирует также его изменения во времени [5].

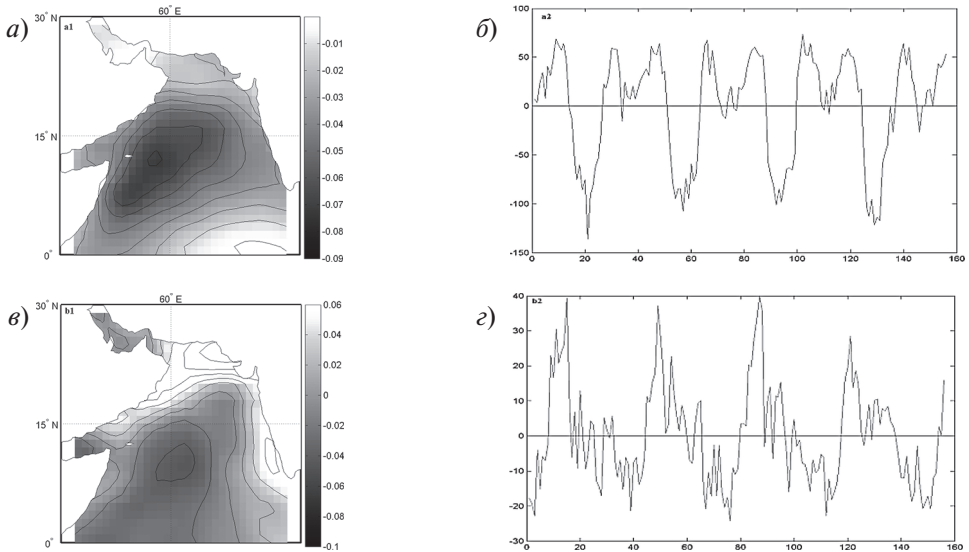


Рис. 4. Первая мода (а, б) и вторая мода (в, г) ЭОФ для Аравийского моря. Первая мода содержит 77,5 % полной дисперсии, а вторая — 5,5 %

Далее мы представим аналогичные расчеты для Бенгальского залива (рис. 5).

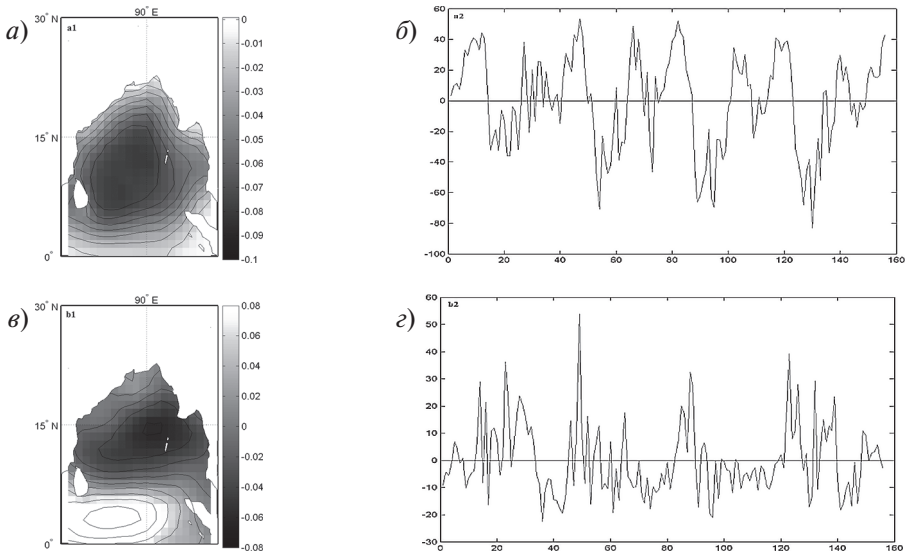


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для Бенгальского залива. Вклад первой моды в полную дисперсию составляет 64,5 %, а второй — 11,7 %

На рис. 5 представлены первая и вторая пространственная (рис. 5а, в) и временная (рис. 5б, г) моды ЭОФ. В соответствии с первой модой самая интенсивная изменчивость скорости приводного ветра наблюдается в центральной части Бенгальского залива (рис. 5а), а вторая мода показывает интенсификацию изменчивости скорости приводного ветра на севере (рис. 5в).

На рис. 5в, г показан временной ход для первой и второй мод. Первая мода показывает положительные значения зимой и отрицательные значения в летний период, т.е. временной ход ЭОФ демонстрирует выраженную годовую периодичность для скорости ветра в Бенгальском заливе. Как следует из рис. 5, амплитуда скорости ветра первой моды зимой сильнее, чем летом, что согласуется с анализом ветра в Аравийском море. Этот временной ход связан с летним и зимним муссоном.

### *Заключение*

В ходе анализа данных NCEP/NCAR выявлены сезонные и межгодовые закономерности изменчивости поля приводного ветра в северной части Индийского океана. Результаты этого исследования показывают то, что в Индийском океане зимний муссон преобладает с ноября по март, в то время как летний муссон — с июня по октябрь. Переход от зимнего муссона к летнему наблюдается в апреле — мае, и от летнего к зимнему — в октябре.

Метод ЭОФ применен для детального анализа поля скорости ветра в Аравийском море и в Бенгальском заливе. Показано, что первая мода временной изменчивости является доминирующей, что отражает годовой цикл скорости ветра в период летних и зимних муссонов в Аравийском море и в Бенгальском заливе. Пространственный анализ показывает, что в первой моде самая интенсивная изменчивость скорости приводного ветра наблюдается в юго-западной части Аравийского моря и в центральной части Бенгальского залива.

Авторы выражают признательность и благодарность за оказанную помощь в письменном переводе статьи на русский язык Е.К. Николаевой, зав. кафедрой русского языка РГГМУ, и К.Г. Евграфовой, аспирантке кафедры океанологии РГГМУ.

### *Литература*

1. Голубкин П.А., Заболотских Е.В., Шапрон Б., Кудрявцев В.Н. О следах тропических циклонов в полях температуры поверхности океана по спутниковым данным. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 32, с. 107–113.
2. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б., Анискина О.Г., Дикинис А.В., Смирнова Ю.Е. Валидация модели переноса излучения на частотах микроволновых радиометров SSMIS и AMSR-E и её применение при анализе морских погодных систем с использованием усовершенствованных алгоритмов. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 146–160.
3. Зуенко Ю.И. Влияние изменений климата на океанологический режим и экосистему Японского моря, 2009. — Электронный ресурс: [<http://earthpapers.net/vliyanie-izmeneniy-klimata-na-okeanologicheskiiy-rezhim-i-ekosistemu-yaponskogo-morya>].

4. *Bhaskaran P.K., Gupta N., Dash M.K.* Wind-wave Climate Projections for the Indian Ocean from Satellite Observations. // *Journal of Marine Science: Research & Development*, 2014, S11: 005. — DOI: 10.4172/2155-9910.S11-005.
5. *Bjornsson H., Venegas S.A.* A manual for EOF and SVD analyses of climate data. McGill University. // CCGCR Report No. 97-1, Montréal, Québec, 1997. — 52 p.
6. *Collins C., Reason C.J.C., Hermes J.C.* (2012). Scatterometer and reanalysis wind products over the western tropical Indian Ocean. // *Journal of Geophysical Research*, 2012, vol. 117, no. C03045. — DOI: 10.1029/2011JC007531.
7. *Gary S.E., Robert L.* Empirical orthogonal function analysis of advanced very high resolution radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel. // *Journal Of Geophysical Research*, 1988, vol. 93, no. C6, pp. 6863–6873.
8. *Glejin J., Sanil Kumar V., Balakrishnan Nair T.M., Singh J.* Influence of winds on temporally varying short and long period gravity waves in the near shore regions of the eastern Arabian Sea. // *Ocean Sci.*, 2013, vol. 9, pp. 343–353. — DOI: 10.5194/os-9-343-2013.
9. *Rashmi R., Samiksha S.V., Polnikov V., Pogarskii F., Sudheesh K., Vethamony P.* Spectral analysis of wind field in the Indian Ocean. // *Indian Journal of Marine Sciences*, 2014, vol. 43(7).
10. *Schott F.A., Xie S.P., McCreary J.P.* Indian Ocean circulation and climate variability. // *Reviews of Geophysics*, 2009, vol. 47, iss. 1, pp. 46. — DOI: 10.1029/2007RG000245.
11. *Shukla J., Misra B.M.* Relationships between sea surface temperature and wind speed over the central Arabian Sea, and monsoon rainfall over India. // *Monthly Weather Review*, 1977, vol. 105, pp. 998–1002.
12. *Tomczak M., Godfrey J.S.* *Regional Oceanography: an Introduction.* — Elsevier Science Ltd, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, England, 1994. — 391 p.