

УДК 551.46(267)+551.461.2+551.465.5

## ВНУТРИГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯ АНОМАЛИЙ УРОВНЯ И ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД АРАВИЙСКОГО МОРЯ

© 2014 г. В. Н. Еремеев<sup>1</sup>, А. Н. Жуков<sup>2</sup>, А. С. Запевалов<sup>2</sup>, Н. Е. Лебедев<sup>2</sup>, А. А. Сизов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Океанологический центр НАН Украины, Севастополь

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

e-mail: director@ibss.iuf.net

Поступила в редакцию 01.08.2012 г., после доработки 28.03.2013 г.

На основе данных спутниковых альтиметрических измерений 1993–2008 гг. проекта AVISO, анализируются изменения поля аномалий уровня и геострофических течений Аравийского моря. На внутригодовых масштабах поле течений в основных чертах согласуется с полученными в ряде предшествующих работ общими схемами циркуляции. Имеющиеся между ними различия связаны с существованием выявленной группы ранее не описанных мезомасштабных вихрей и струйных течений.

DOI: 10.7868/S0030157414020075

### ВВЕДЕНИЕ

Северная часть Индийского океана привлекает к себе внимание исследователей прежде всего необычным, мало где еще встречающимся реверсивным характером поверхностной циркуляции. Наблюдающиеся здесь циклические внутригодовые изменения ветрового режима приводят к значительной перестройке динамики поверхностных течений и соответствующей релаксации уровня поверхности Аравийского моря [1]. Основная структура муссонного типа поля ветра над Индийским океаном к северу от 10° ю.ш. меняется дважды в год. В период летнего муссона (май–сентябрь) здесь господствуют юго-западные ветры, в период зимнего муссона (ноябрь–март) – северо-восточные. В период летнего муссона скорость ветра значительно выше, чем в зимний сезон. Апрель и октябрь являются переходными месяцами, когда скорость ветра обычно мала, а его направление неустойчиво [7, 18].

До недавнего времени основные представления о поле течений Аравийского моря формировались на основе данных контактных измерений и численного моделирования [3, 7, 20]. За последние 50 лет было осуществлено несколько крупных проектов по изучению течений в Индийском океане, в рамках которых проводились как эпизодические, так и более длительные серии инструментальных наблюдений. Начало крупномасштабным систематическим исследованиям Индийского океана было положено в 1961–1965 гг. во время проведения Международной Индоокеанской экспедиции.

К периоду 1960–1980-х гг. относятся пионерские исследования экваториальных течений Ин-

дийского океана, выполненные на исследовательских судах СССР – “Витязь”, “Академик Курчатов”, “Дмитрий Менделеев”, “Академик Вернадский” и др. [7]. Так, в 1960 г. в 31-м рейсе “Витязя” было открыто подповерхностное экваториальное противотечение Индийского океана, названное впоследствии именем Тареева. В 1990-е гг. исследования были продолжены в рамках крупных международных проектов Indian Ocean Experiment (INDEX), World Ocean Circulation Experiment (WOCE) [25] и др. Большое внимание в этих программах было уделено уникальному знакопеременному Сомалийскому течению, являющемуся самым интенсивным струйным течением Мирового океана с мгновенными скоростями до 3 м/с [1].

Весьма значительная сезонная изменчивость циркуляции верхнего слоя северной части Индийского океана и ограниченное количество данных измерений в масштабе десятилетий приводят к тому, что даже в построенных различными авторами климатических схемах течений этого региона можно обнаружить заметные различия [7, 25, 27]. Существенное влияние на появление части таких различий может оказывать недостаточный или вообще отсутствующий в таких работах учет динамики мезомасштабных вихрей [14, 25]. Как правило, практически все исследования вихревой структуры поверхностной циркуляции в Индийском океане до сих пор ограничивались изучением лишь отдельных наиболее крупных вихрей. При этом длина временных рядов, использованных для анализа их динамики, обычно не превышала нескольких сезонов [13, 23].

С развитием спутниковых методов и средств измерений появилась возможность с высоким

## Названия и акронимы течений и вихрей Аравийского моря

| Акронимы | Англоязычное название       | Русскоязычное название                                     |
|----------|-----------------------------|--|
| SC       | Somali Current              | Сомалийское течение  |
| WMC      | Winter Monsoon Current      | Зимнее муссонное течение                                   |
| SMC      | Summer Monsoon Current      | Летнее муссонное течение                                   |
| WICC     | West India Coastal Current  | Западно-Индийское прибрежное (Восточно-Аравийское) течение |
| GW       | Great Whirl                 | Большой Сомалийский вихрь                                  |
| LH       | Lakshadweep (Laccadiv) High | —  |
| LL       | Lakshadweep (Laccadiv) Low  | —  |

пространственно-временным разрешением получать данные об уровне морской поверхности, который является одним из основных индикаторов термодинамических процессов, протекающих в толще океана [4, 9, 24]. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем данных альтиметрических измерений, позволяющий уточнить общие схемы циркуляции вод в верхнем слое различных регионов Мирового океана и проанализировать ее изменчивость на доступных временных масштабах.

Целью настоящей работы является анализ внутригодовой изменчивости аномалий уровня и особенностей циркуляции вод Аравийского моря на основе 16-летнего ряда данных спутниковой альтиметрии (1993–2008 гг.).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходной информации были использованы аномалии уровня моря и поля геострофических течений, представленные в виде готового продукта на сайте проекта AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>). Для изучения изменчивости аномалий уровня Аравийского моря за период с января 1993 по декабрь 2008 гг. использовались комбинированные средненедельные альтиметрические данные спутников Jason-1, 2, TOPEX/Poseidon (T/P), ENVISAT, GEOSAT Follow-On (GFO), ERS-1/2 и Geosat (<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/index.html>). Эти данные были осреднены помесячно в узлы неравномерной сетки с шагом по долготе  $1/3^\circ$  и с переменным шагом по широте от  $1/3^\circ$  на экваторе до  $0.05^\circ$  — на широте  $82^\circ$ . Используемый в работе способ гридирования данных описан в [16]. При создании рабочих массивов в исходные альтиметрические данные были введены необходимые для таких измерений поправки [5, 15, 20]. Описание и оценки погрешностей, возникающих при расчете аномалий уровня морской поверхности и поля течений, представлены в [28, 25]. Вектор скорости течений в анализе представлен в виде его зональной ( $U$ ), меридиональной ( $V$ ) компонент и модуля ( $M$ ).

Для анализа была выбрана часть акватории Индийского океана в пределах, близких к использованному в [27]:  $5.0^\circ$ – $30.5^\circ$  с.ш.,  $43.0^\circ$ – $77.0^\circ$  в.д. При этом приняты во внимание результаты анализа внутригодовой и межгодовой изменчивости атмосферного давления и температуры воды, полученные в [17]. Значения годового хода, летних, зимних и среднегодовых величин исследуемых параметров рассчитывались по стандартным процедурам [8].

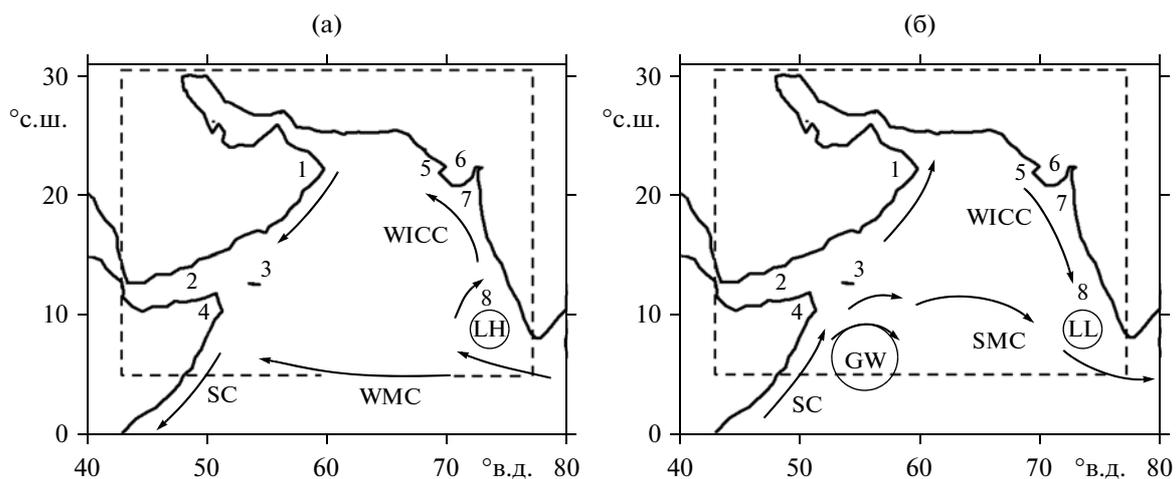
Для более подробного анализа исследуемая акватория была разбита на четыре части, для каждой из которых, как и для всей акватории в целом, рассчитывались указанные выше средние по пространству характеристики. Разбиение на четыре квадранта: северо-запад (СЗ), северо-восток (СВ), юго-запад (ЮЗ) и юго-восток (ЮВ) было выполнено с границами между севером и югом по  $15^\circ$  с.ш., между западом и востоком — по  $63^\circ$  в.д.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

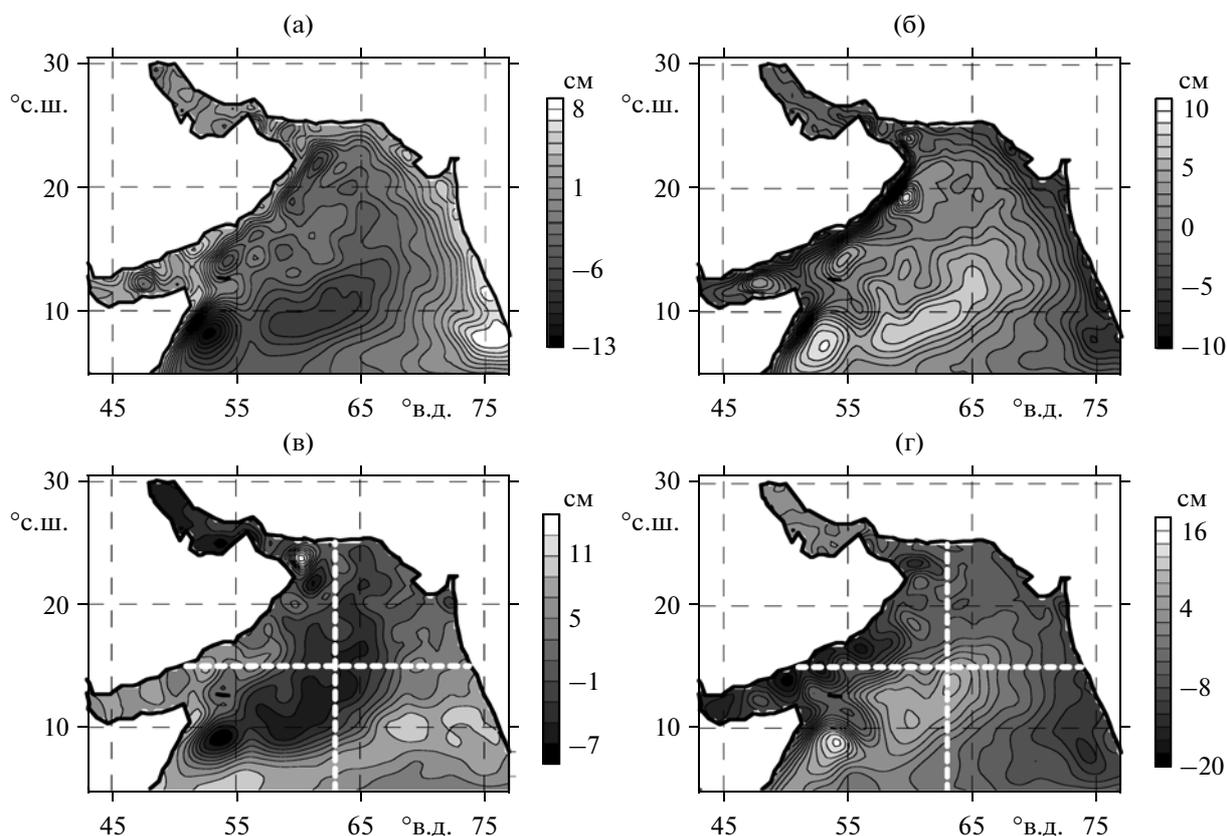
Изучению динамики Индийского океана посвящено большое количество исследований, проведенных на основе натуральных наблюдений и численного моделирования. Результаты этих исследований обобщены в работах [7, 14, 27], в которых предложены схемы течений в северной части Индийского океана. Комбинированные схемы течений в зимний и летний сезоны, построенные на основе указанных работ для исследуемого в настоящей работе региона, представлены на рис. 1. Границы региона обозначены штриховой линией. Расшифровка приведенных на рис. 1 и встречающихся далее в тексте акронимов дана в таблице.

Следует отметить, что в некоторых англоязычных работах используются другие названия и соответственно иные акронимы указанных на схеме течений [27]. В русскоязычных работах также отсутствует единообразие, и ряд течений у разных авторов имеют разные названия [7]. Для вихрей LH и LL русскоязычные названия найдены не были.

Район исследований характеризуется сложной системой течений, которая существенно меняется в зависимости от сезона. Сложная динамика



**Рис. 1.** Климатическая схема течений Аравийского моря в январе (а) и июле (б). Цифрами обозначены: 1 – мыс Рас-Аль-Хадд, 2 – Аденский залив, 3 – остров Сокотра, 4 – мыс Рас-Асир, 5 – Качский залив, 6 – полуостров Катхиявар, 7 – Камбейский залив, 8 – Лаккадивские острова.



**Рис. 2.** Средние за 1993–2008 гг. поля аномалий уровня Аравийского моря (см) в периоды зимнего (а) и летнего (б) муссонов, а также аналогичные поля для марта (в) и сентября (г). На двух последних полях пунктиром показаны квадранты акватории моря.

верхнего слоя Аравийского моря отражается в вариациях его уровня. На рис. 2 представлены средние за период 1993–2008 гг. распределения анома-

лий уровня, построенные для зимнего и летнего сезонов. Характерной особенностью представленных распределений является то, что там, где в летний

сезон имеют место положительные аномалии уровня, в зимний сезон они имеют отрицательные значения, и наоборот.

Вдоль всей сухопутной границы Аравийского моря в летний период наблюдается полоса отрицательных аномалий уровня морской поверхности, сменяющихся в зимний период положительными аномалиями. Сравнение аномалий уровня у западного и восточного побережий показывает, что у восточного побережья они меняются в более широких пределах и охватывают значительно более широкую полосу, чем у западного.

По данным альтиметрических измерений, в зимний период наибольшие значения аномалий уровня имеют место вблизи южной оконечности Индостанского полуострова, где наблюдается антициклонический вихрь LH. Этот вихрь охватывает верхний слой толщиной 300–400 м [14]. В январе происходит смещение вихря в западном направлении, затем наступает его диссипация. В период летнего муссона вихрь LH сменяется вихрем LL с отрицательными значениями аномалий уровня. Как и вихрь LH, спустя несколько месяцев после возникновения вихрь LL начинает смещаться на запад и диссипировать. Численное моделирование показывает, что появление вихрей LH/LL, по крайней мере частично, обусловлено влиянием течений Бенгальского залива [13].

В период летнего муссона в юго-западной части исследуемого региона появляется большой холодный антициклонический вихрь GW. В нем средняя аномалия уровня составляет около 10 см. Вихрь GW обычно наблюдается в области  $4^{\circ}$ – $10^{\circ}$  с.ш.,  $52^{\circ}$ – $58^{\circ}$  в.д. в течение августа и сентября. Этот вихрь является одним из основных факторов, формирующих апвеллинг у берегов Сомали и обеспечивающих перенос холодных вод во внутреннюю область Аравийского моря [13, 22].

Заканчивая анализ распределений средних аномалий уровня, построенных для зимнего и летнего сезонов, отметим, что в Персидском заливе они меняются в пределах нескольких сантиметров. Положительные значения аномалий уровня имеют место в зимний период. В Красном море диапазон изменений аномалий уровня несколько шире. Как и в Персидском заливе, положительные значения аномалий уровня наблюдаются в период зимнего муссона.

Дистанционное зондирование позволяет воспроизвести распределение гидрофизических характеристик более детально, чем контактные измерения. В частности, к северо-востоку от антициклонического вихря GW наблюдается еще один меньший по масштабу антициклонический вихрь [11]. Проведенный анализ показал, что в зимний сезон этот антициклонический вихрь сменяется циклоническим.

К числу квазиустойчивых мезомасштабных вихрей можно также отнести меняющие свой знак вихри у южного побережья Омана и на входе в Оманский залив, а также вихрь с противоположной динамикой завихренности в Камбейском заливе. Более сложным объектом является смещенный на ЮЗ крупный вихрь в центре моря, образуемый несколькими меньшими вихрями. Кроме вихря GW, в районе побережья Сомали в литературе описаны еще два – Southern Gyre и Sokotra Eddy [19].

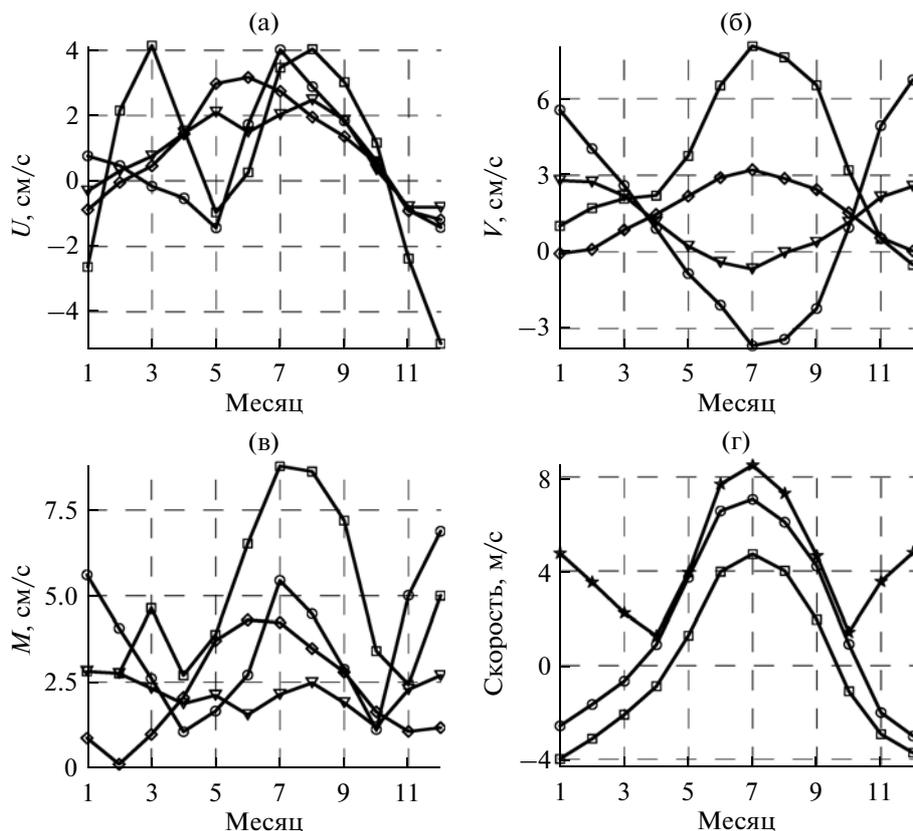
Предварительная оценка статистики выявленной группы мезомасштабных вихрей показала следующее: количество вихрей и их распределение по масштабам в зимний и летний сезоны различаются незначительно. Наибольшее количество вихрей (10–15) имеет диаметр 100–150 км. Общее число вихрей диаметром 200–300 км не превышает 10–12. Вихри большего диаметра единичны. Внутригодовой ход количества вихрей имеет максимум в феврале–марте (около 35) и минимум в июле–сентябре (около 15).

На рис. 3а–3в показан годовой ход компонент вектора скорости поверхностных течений Аравийского моря; значения модуля на рис. 3в рассчитывались по соответствующим значениям компонент вектора скорости. Для моря в целом в годовом ходе преобладает изменчивость зональной компоненты, в основном за счет юго-западного квадранта. Ее амплитуда составляет  $\sim 5.5$  см/с, тогда как амплитуда меридиональной компоненты –  $\sim 0.8$  см/с (рис. 3б).

За счет значений зональной компоненты летние скорости поверхностных течений примерно в два раза выше зимних. Представляет интерес локальный максимум зональной компоненты скорости в феврале–апреле, связанный с юго-западным квадрантом. Эта особенность будет рассмотрена ниже, при анализе поля течений. Можно также отметить, что летний максимум зональной компоненты в северо-западном квадранте наступает на 1–2 месяца раньше, чем в других квадрантах.

Кривые меридиональных компонент скорости восточных и западных квадрантов в течение всего года меняются в противофазе, с точками пересечения в апреле и октябре. Это приводит к небольшим значениям амплитуды годового хода меридиональной компоненты при осреднении по всему морю. По квадрантам размах межсезонных колебаний на юго-западе достигает 9 см/с, на юго-востоке – 11 см/с, на севере 3–4 см/с.

Летний максимум меридиональных компонент для всех квадрантов приходится на июль, зимний – на декабрь. Это хорошо соответствует годовому ходу компонент вектора скорости приповерхностного ветра (рис. 3г). Для расчета кривых на рис. 3г были использованы среднемесячные спутниковые данные измерений приповерхностного ветра за 1987–2008 гг. на сетке  $0.25^{\circ} \times$



**Рис. 3.** Годовой ход, осредненный по квадрантам (СЗ – ромбы, СВ – треугольники, ЮЗ – квадраты, ЮВ – круги) Аравийского моря, для зональной (а), меридиональной (б) компонент и модуля (в) вектора скорости поверхностных течений. То же для компонент (зональная – круги, меридиональная – квадраты) и модуля (звезды) вектора скорости приповерхностного ветра для моря в целом (г).

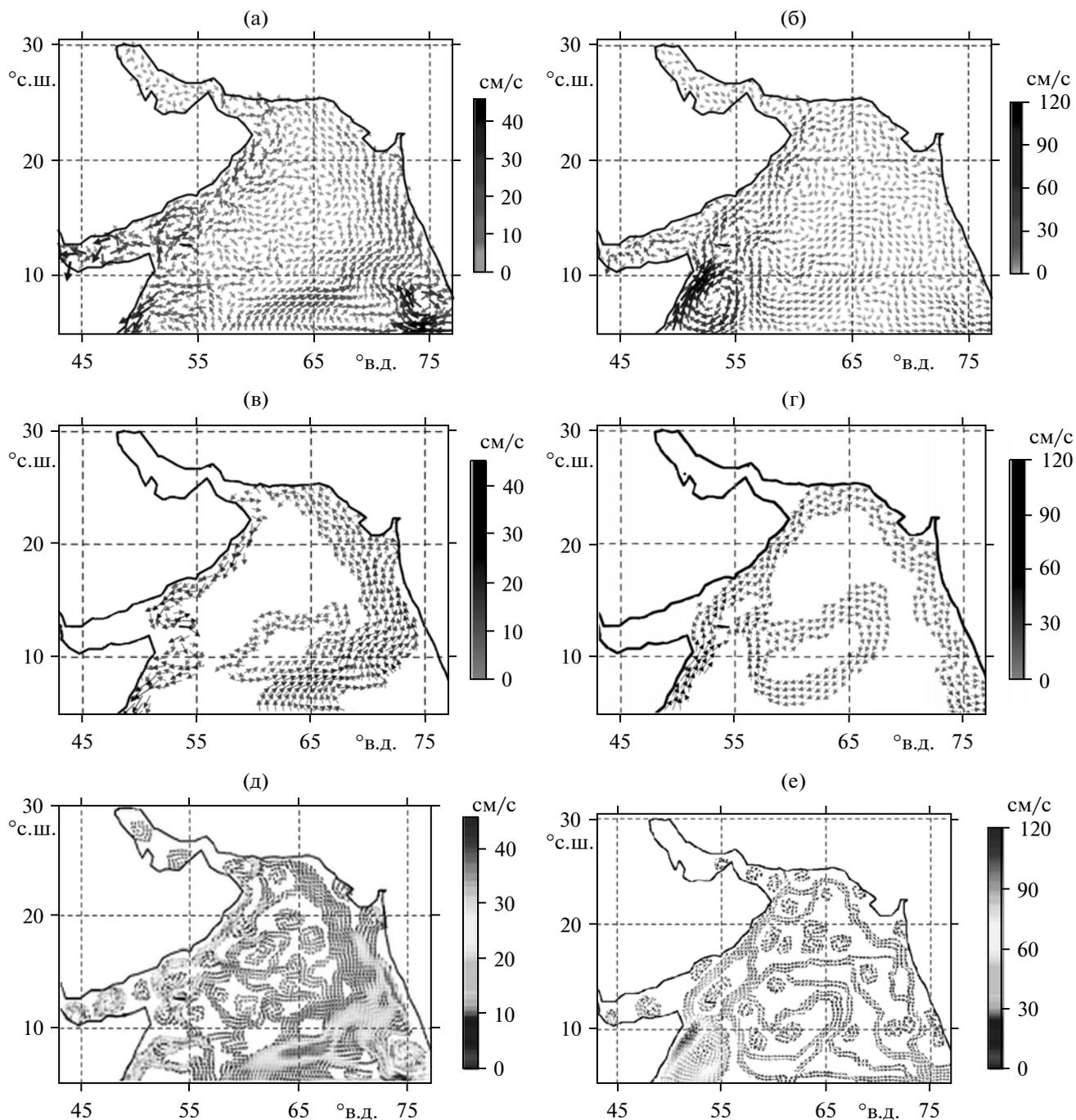
$\times 0.25^\circ$  из базы Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind (<ftp://podaac.ftp.jpl.nasa.gov/all-Data/ccmp/L3.5a/monthly/flk/>) [12]. В годовом ходе модуля скорости поверхностных течений Аравийского моря присутствуют те же особенности, что в годовом ходе ее компонент.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Общая картина циркуляции вод Аравийского моря в большинстве публикаций на эту тему детализируется редко. Основная причина этого – недостаток данных наблюдений. В этой работе мы решили предпринять такую попытку, опираясь на массив AVISO с дискретностью  $0.33^\circ$ . Анализ полученных по альтиметрическим данным полей поверхностных течений Аравийского моря для разных сезонов года показал наличие у них достаточно сложной, динамичной структуры (рис. 4). В целом такая структура состоит из разномасштабных струйных течений, сочетающихся и отчасти включающих в себя несколько (иногда до трех) десятков мезомасштабных вихрей с разными периодами существования. В среднем их диаметр составляет 200–300 км.

Существование одной из групп квазиустойчивых (за все время альтиметрических наблюдений) мезомасштабных вихрей, расположенных вдоль берега, очевидным образом привязано к участкам его неоднородностей (рис. 4д, 4е). Все они формируются в местах активного взаимодействия сезонных вдольбереговых течений с крупными выступами – мысами берега, либо с островами.

Наиболее крупные вихри связаны с южной оконечностью Индостана, районом Африканского рога (мыс Рас-Асир, Сомали) и о. Сокотра. Еще несколько вихрей формируются в районе мыса Рас-Аль-Хадд (Оман). Более слабо выраженная пара вихрей связана с выступом берега между Качским и Камбейским заливами (п-ов Катхиявар, Индия). Антициклонический вихрь на входе в Камбейский залив сохраняет знак завихренности в течение всего года, но лучше выражен зимой. Вихрь около Качского залива летом имеет циклоническую, а зимой антициклоническую завихренность. Из двух мезомасштабных вихрей в районе  $45^\circ$  и  $48^\circ$  в.д. в Аденском заливе первый в течение года – циклон, а второй летом – антициклон, зимой – циклон.



**Рис. 4.** Средние за 1993–2008 гг. поля течений Аравийского моря в периоды зимнего (а) и летнего (б) муссонов. Эти же поля после выделения основных сезонных круговоротов (в, г) и совокупности основных струйных течений и квази-стабильных мезомасштабных вихрей (д, е).

Для центральной части акватории характерно наличие квазиустойчивого крупного вихря. Из рис. 4д, 4е видно, что и зимой, и летом этот центральный вихрь включает в себя от 2 до 4 мезомасштабных вихрей, а его завихренность соответствует основным сезонным направлениям течений (рис. 4в, 4г). Летом его диаметр близок к 800–1000 км и он смещен к юго-западу, сосед-

ствуя с вихрем GW. Зимой центральный вихрь несколько уменьшается в размерах и смещается к востоку, практически сливаясь своей юго-восточной периферией с Восточно-Аравийским течением (рис. 4в). Количество внутренних вихрей в нем уменьшается, и они, как и вихрь в целом, приобретают циклоническую завихренность. Другими словами, в период летнего муссона формируются

антициклонические, а в период зимнего — циклонические центральные круговороты.

Средние за весь период наблюдений поля скорости были рассчитаны за три зимних и три летних месяца (рис. 4д, 4е). Из этих рисунков видно, что между западной и восточной половинами акватории есть существенная разница в значениях модуля скорости течений. Летом в пределах Сомалийского течения значения модуля снижаются с 120 см/с у берега Сомали до 20–30 см/с у входа в Оманский залив. Для всей остальной части достаточно сложной системы течений, переносящих воду на восток и юго-восток, значения модуля ближе к 10 см/с. Эти скорости характерны практически для всех мезомасштабных вихрей, кроме GW, где они составляют 60–90 см/с.

Зимой максимальные скорости течений (до 50 см/с) наблюдаются на востоке и связаны с активизацией вихря LH. Далее на север значения модуля довольно быстро снижаются до 15–20 см/с. У побережья Пакистана они падают до 5–10 см/с и снова возрастают до 15–25 см/с к югу от мыса Рас-Аль-Хадд вплоть до побережья Сомали.

В целом такую структуру течений можно было бы описать как “древовидно-вихревую”. Подобное определение связано с тем, что летом из основной струи Сомалийского течения (а зимой Восточно-Аравийского течения) выделяется несколько ветвей — локальных струйных течений (рис. 4д, 4е). Эти локальные течения, сами иногда ветвящиеся на своем пути, в сочетании с действием группы мезомасштабных вихрей и осуществляют массоперенос в верхнем слое моря на восток (или запад) в течение одного сезона. Такой тип структуры полей известен, например, в теории фракталов, при ее использовании для описания нестационарных явлений, относящихся к сфере действия нелинейных, циклических или автореферентных процессов динамических систем [6].

Анализ средних за весь период наблюдений полей на каждый месяц года позволил найти объяснение вышеописанному локальному максимуму зональной компоненты скорости течений в юго-западном квадранте моря в марте (рис. 3а). Данное явление связано с усилением в этот период (февраль–апрель) течения между 7° и 9° с.ш., направленного на восток против ветра (рис. 5а, 5б). По-видимому, это течение носит компенсационный характер — с его помощью “сбрасывается” избыточный объем воды, накопившейся у побережья Африки к концу зимнего муссона за счет WMC. Скорости в этом течении в районе 60°–65° в.д. могут достигать 30–35 см/с. В марте это течение от 65° в.д. начинает разворачиваться на северо-восток.

Характерные особенности данного течения в общих чертах близки к описанному в [7] для зимнего сезона течению восточного направления, названного авторами течением Штокмана. Вме-

сте с тем, между описанием в [7] и рис. 5а, 5б есть определенные географические несовпадения. В связи с этим был проведен дополнительный анализ циркуляции вод северной части Индийского океана для расширенного относительно рис. 2 фрагмента его поверхности в пределах 20.0° ю.ш.—30.5° с.ш., 37.0°–90.0° в.д. По тем же исходным данным были еще раз рассчитаны средние за весь период наблюдений поля течений на каждый месяц года. Полученные результаты для февраля, марта, ноября и декабря приведены на рис. 5в–5е.

Анализ этих полей для каждого месяца года показал, что течение Штокмана, именно так, как оно описано в [7], существует только в течение ноября. Уже в декабре в районе 63°–65.0° в.д. оно начинает разделяться на две части — восточную и западную. К марту западная часть постепенно сливается с восточной периферией GW, смещаясь вместе с ним к юго-западу. В это же время восточная часть трансформируется в еще одну, проходящую западнее Лаккадивских островов, ветвь WMC, которая движется на север, образуя Восточно-Аравийское (Западно-Индийское, по терминологии [27]) течение.

Именно эта ветвь WMC вместе с его основным потоком, постепенно смещаясь на запад, достигает в марте побережья Африки у 7°–8° с.ш. А увеличение скорости этого течения в феврале–марте на участке между 55°–65° в.д. до 30–35 см/с приводит к росту уровня моря в районе Мумбаи [26]. Если считать эту ветвь WMC самостоятельным течением, то его можно было бы назвать Северо-Восточным Аравийским. Эти результаты нашего анализа существенно дополняют классическую схему течений, представленную на рис. 1.

Аналогичный анализ, проведенный для расширенного фрагмента поверхности Индийского океана (рис. 5в–5е), также выявил упомянутую выше “древовидно-вихревую” структуру поверхностной циркуляции. Характерной чертой такой структуры является ее динамизм, постоянная перестройка, происходящая месяц за месяцем в среднем по одной и той же схеме. Детальный анализ этих результатов выходит за рамки данной работы.

В дальнейшем необходимо проанализировать связь сезонной и межгодовой изменчивости течений Аравийского моря с событиями Эль-Ниньо. В [10] показано, что наблюдается идентичность и квазисинхронность проявления феномена Эль-Ниньо в Тихом и Индийском океанах, которая выражается в перемене полярности их зональных гидрофизических диполей и в смене знака атмосферной циркуляции в соответствующих ячейках Уокера. В период северо-восточного муссона Эль-Ниньо приводит к интенсификации восточного переноса в атмосфере и, соответственно, к увеличению скорости зимнего муссонного течения [2]. В период юго-западного муссона влияние

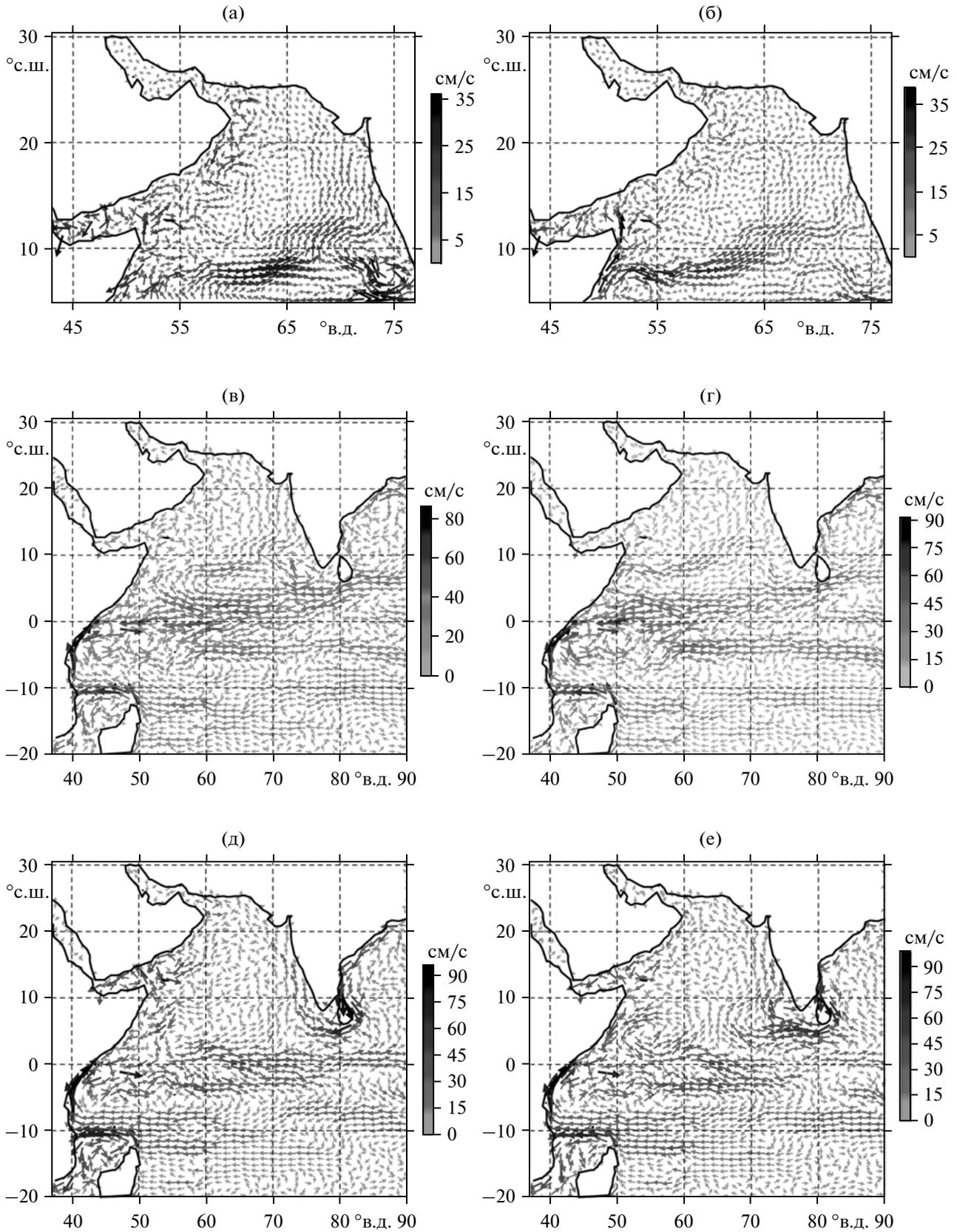


Рис. 5. Средние за 1993–2010 гг. поля течений Индийского океана в феврале (а, в), марте (б, г), ноябре (д) и декабре (е).

Эль-Ниньо проявляется в изменениях векторной структуры циркуляции нижней тропосферы, которые приводят к уменьшению скорости экваториального переноса в океане.

Результаты, полученные на основе спутниковых данных, нуждаются в проверке контактными методами. В связи с этим остается актуальным вопрос возобновления практики масштабных полигонных съемок. Будет ли это какой-либо современный вариант методики, предложенной в конце 1960-х годов В.Б. Штокманом, или нужный результат даст наращивание возможностей действующей системы дрейфтеров, покажет время.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ среднемесячных полей течений Аравийского моря, рассчитанных на основе альтиметрических данных, показал, что в основном они и их годовой ход хорошо согласуются с их климатическими схемами, созданными на основе контактных измерений. Однако некоторые детали, связанные с существованием выявленных по альтиметрическим измерениям ранее не описанных мезомасштабных вихрей и струйных течений, нуждаются в уточнении. То же можно сказать и о результатах анализа среднемесячных полей аномалий уровня и их годового хода по спутниковым данным.

Наиболее заметные расхождения имеют место в центральной части Аравийского моря, где в зимний период наблюдается обширная область отрицательных значений аномалий уровня моря (до  $-7$  см). В летний период в этой области знак аномалий уровня меняется и наблюдаются положительные значения, достигающие 8 см. На всей акватории Аравийского моря наблюдается хорошо выраженный годовой ход аномалий уровня морской поверхности. В южной части моря годовой ход выражен значительно сильнее, чем в северной.

Годовой ход зональной, меридиональной компонент и модуля вектора скорости течений также хорошо выражен. В среднем по морю летний максимум скорости течений достигается в июле, зимний — в декабре. Наблюдающийся в марте пик значений скорости течений в юго-западном квадранте вызван интенсификацией направленной в это время на северо-восток ветви зимнего муссонного течения. Данное сезонное течение формируется у побережья Африки у  $7^{\circ}$ – $8^{\circ}$  с.ш. и может быть названо Северо-Восточным Аравийским течением.

Анализ циркуляции вод для каждого месяца года и в среднем для каждого сезона года показал наличие группы ранее не описанных мезомасштабных вихрей и струйных течений. В целом выявленная структура циркуляции может быть оха-

рактеризована как “древовидно-вихревая”. Использование данного термина связано с тем, что летом из основной струи Сомалийского течения (а зимой Восточно-Аравийского течения) выделяется несколько ветвей — струйных течений меньшей интенсивности. Эти течения, сами иногда ветвящиеся на своем пути, в сочетании с действием группы мезомасштабных вихрей осуществляют массоперенос в верхнем слое моря на восток (или запад) в течение одного сезона.

Авторы благодарят чл.-корр. РАН В.Г. Неймана за его полезные замечания по содержанию работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бышев В.И., Нейман В.Г., Серых И.В., Щербинин А.Д. О роли муссонного фактора в изменчивости течений Индийского океана // Метеорология и гидрология. 2007. № 3. С. 54–68.
2. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О влиянии событий Эль-Ниньо на климатические характеристики Индоокеанского региона // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 1–11.
3. Дианский Н.А., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н., Русаков А.С. Моделирование муссонной циркуляции Индийского океана с высоким пространственным разрешением // Океанология. 2006. Т. 46. № 5. С. 650–671.
4. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ — Гидрофизика, 2006. 382 с.
5. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
6. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: УРСС, 2000. 336 с.
7. Нейман В.Г., Бурков В.А., Щербинин А.Д. Динамика вод Индийского океана. М.: Научный Мир, 1997. 232 с.
8. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: ГМИ, 1967. 242 с.
9. Пустовойтенко В.В., Запелов А.С. Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия — Современное состояние, перспективы и проблемы // Серия “Современные проблемы океанологии”. Севастополь: “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2012. Вып. 11. 218 с.
10. Серых И.В. О влиянии событий Эль-Ниньо на климат Индопацифики // Труды молодых ученых. 2010. № 2. С. 149–157.
11. Arabian Marginal Seas and Gulfs. Report of a Workshop held at Stennis Space Center, Miss. 11–13 May 1999. University of Miami RSMAS Technical Report 2000-01. 60 p.
12. Atlas R., Hoffman R.N., Ardizzone J. et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2011. V. 92. № 2. P. 157–174. (doi: 10.1175/2010BAMS-2946).

13. *Brandt P., Dengler M., Rubino A. et al.* Intraseasonal variability in the southwestern Arabian Sea and its relation to the seasonal circulation // *Deep-Sea Res. II*. 2003. V. 50. № 12–13. P. 2129–2141.
14. *Bruce J.G., Johnson D.R., Kindle J.C.* Evidence for eddy formation in the eastern Arabian Sea during the northeast monsoon // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 № C4. P. 7651–7664. (doi: 10.1029/94-JC00035).
15. *Dorandeu J., Le Traon P.Y.* Effects of global mean pressure variations on sea level changes from T/P // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1999. V. 16. № 9. P. 1279–1283.
16. *Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G.* Global high-resolution mapping of ocean circulation from the combination of T/P and ERS-1/2 // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № C8. P. 19 477–19 498.
17. *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 // *International Journal of Oceans and Oceanography*. 2012. V. 6. № 2. P. 83–93.
18. *Hellerman S., Rosenstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *Journal of Physical Oceanography*. 1983. V. 13. № 7. P. 1093–1104.
19. *Lee-Lueng Fu, Cazenave A.* *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. London: Academic Press, 2001. 495 p.
20. *Le Traon P.Y., Ogor F.* ERS-1/2 orbit improvement using T/P: The 2 cm challenge // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C4. P. 8045–8057.
21. *Murtugudde R., Busalacchi A.J.* Interannual variability of the dynamics and thermodynamics of the tropical Indian ocean // *J. Climate*. 1999. V. 12. № 8. P. 2300–2326.
22. *Nagar S.G., Iyer U., Seetaramayya P.* Observed variations in air-sea exchange processes over Somali basin during monsoons 1988 and 1991 // *Journal of Atmospheric & Ocean Science*. 2005. V. 10. № 1. P. 43–60. (doi: 10.1080/17417530500092157).
23. *Prasad T.G., Ikeda M.* Spring evolution of Arabian Sea high in the Indian ocean // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № C11. P. 31085–31098. (doi: 10.1029/2000JC000314).
24. *Rio M.-H., Hernandez F.* A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 109. C12032. (doi: 10.1029/2003JC002226).
25. *Schott F.A., Julian P., McCreary Jr.* The monsoon circulation of the Indian Ocean // *Progress in Oceanography*. 2001. V. 51. № 1. P. 1–123.
26. *Shankar D.* Seasonal cycle of sea level and currents along the coast of India // *Current Science*. 2000. V. 78. № 3. P. 279–288.
27. *Shankar D., Vinayachandran P.N., Unnikrishnan A.S.* The monsoon currents in the north Indian Ocean // *Progress in Oceanography*. 2002. V. 52. № 1. P. 63–120.
28. *Ssalto/Duacs User Handbook. (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products*. 2006. CLS-DOS-NT-06.034.

## Seasonal Variations of the Arabian Sea Level Anomaly Fields and Circulation

V. N. Eremeev, A. N. Zhukov, A. S. Zapevalov, N. E. Lebedev, A. A. Sizov

The changes in the Arabian Sea level anomaly field and geostrophic currents are analyzed based on the data of satellite altimetry measurements in 1993–2008 within the framework of AVISO project. On the intra-annual scale, the current field generally agrees with the circulation schemes published in a number of previous works. Their differences are due to existence of the revealed group of previously unnoticed mesoscale eddies and jet currents.