

**ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ РЕ-АНАЛИЗОВ ДЛЯ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ
ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА.
ЧАСТЬ 1. СРЕДНЕМОГОЛЕТНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

А.Б. Полонский, А.В. Торбинский, А.В. Губарев

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

Целью настоящей работы является верификация гидрофизических данных ре-анализов ORAS5/SODA3/GLORYS по данным инструментальных наблюдений RAMA в Индийском океане. Используются данные о потенциальной температуре, солёности и зональной компоненте вектора течений за период 2007–2018 гг. к югу от экватора для сравнения среднесезонных гидрофизических характеристик, рассчитанных по данным ре-анализов и по прямым наблюдениям на буях за каждый месяц. Показано, что в местах постановки буев RAMA на 12° ю.ш. ре-анализы ORAS5, GLORYS и SODA3 хорошо воспроизводят среднесезонные данные измерений по потенциальной температуре и солёности. Величины зональной компоненты вектора течений во всех трех ре-анализах меньше наблюдаемых величин на 2–31%. Ре-анализ ORAS5 в целом меньше занижает величину средней зональной скорости.

Ключевые слова: RAMA, SODA3, ORAS5, GLORYS, критический слой, Индоокеанский диполь.

Поступила в редакцию: 10.08.2020. После доработки: 31.08.2020.

Введение. Результаты оперативных ре-анализов в последнее время приобретают все более широкое распространение для изучения процессов в системе «океан–атмосфера». Возможность получения регулярных архивов ретроспективных пространственно-временных данных основных гидрофизических и метеорологических параметров является одним из главных достоинств ре-анализов. Эта информация может быть использована при решении как фундаментальных, так и прикладных задач. Ее привлечение необходимо для качественного мониторинга и прогноза состояния системы «океан–атмосфера». При этом следует иметь в виду, что данные конкретного ре-анализа получены при помощи определенной гидродинамической модели с фиксированной конфигурацией в результате ассимиляции некоторого набора архивных наблюдений. Такие данные могут существенно отличаться от результатов прямых инструментальных измерений. Это может быть следствием не только ошибок, допущенных при построении и реализации численной модели, но и результатом чрезмерного сглаживания полей, в том числе и вследствие ее недостаточно высокого разрешения. В связи с этим, совместный анализ данных

реальных наблюдений и различных продуктов ре-анализа очень важен для верификации последних. В Индо-океанском регионе, где региональные климатические аномалии являются прямым следствием изменения поля температуры в верхнем слое океана, а количество высококачественных океанографических наблюдений мало [1], эта проблема особенно актуальна.

Ранее авторами настоящей работы была продемонстрирована важная роль внеэкваториальных океанических волн в распространении термических аномалий в тропической зоне Индийского океана в зональном направлении. С помощью климатических данных ре-анализа ORAS3 было показано [2], что в окрестности 13° ю.ш. возможно существование критического слоя, в котором фазовая скорость волн Россби равна средней скорости зональных течений. В этом слое за счет неустойчивости системы зональных течений возможна генерация растущих возмущений, являющихся внутренней Индоокеанской модой. Позже, в другой работе [3] по данным ре-анализа ORAS5 были уточнены параметры критического слоя и продемонстрировано, что он формируется на глубине 0–500 м в западной части бассейна в окрестности 11°–

12° ю.ш. Именно здесь, начиная с мая и заканчивая ноябем, возможно развитие неустойчивости в системе среднеклиматических зональных течений [4]. Если же рассматривать не ежемесячные данные, осредненные за весь период наблюдений, а брать конкретные годы и сезоны, то, вероятно, полученные результаты позволят в будущем выделить события Индоокеанского диполя (ИД) разных типов [5]. Для точной идентификации таких событий среднемесячные величины гидрофизических параметров, полученные в ре-анализах, должны быть максимально близки к реальным.

Цель настоящей работы заключается в сопоставлении данных ре-анализов ORAS5, GLORYS и SODA3 с фактическими инструментальными измерениями. Для этого было проведено сравнение полученных результатов ре-анализов с данными измерений, выполненных на заякоренных буях RAMA. Предполагается, что выбор более совершенного ре-анализа позволит более точно определить время и регион формирования критического слоя в тропической зоне Индийского океана на среднегодовом и среднемесячном масштабах. Это принципиально важно для мониторинга ИД и его региональных проявлений, а также для уточнения механизма генерации ИД как независимой моды, не связанной с тихоокеанскими событиями Эль-Ниньо – Южное Колебание.

Материалы и методы. В настоящей работе использовались результаты оперативного ре-анализа [6] Европейского центра среднесрочного прогноза погоды, численной реализации гидродинамической модели океан – атмосфера [7], глобального океанического ре-анализа [8] Европейской службы мониторинга морской среды Copernicus и исследовательского массива RAMA [9] по потенциальной температуре T (°C), солености S (‰) и зональной компоненте скорости течений U (м/с) в Индийском океане за период 2007–2018 гг. Продолжительность исследуемого периода ограничена набором доступных инструментальных наблюдений по программе RAMA. Использовались данные ре-анализов с месячным разрешением в узлах

регулярных сеток: 1° на 1° (ORAS5), 0,25° на 0,25° (GLORYS) и 0,5° на 0,5° (SODA3). Из данных массива RAMA использовались результаты ежесуточных измерений, полученных на заякоренных буях (MRB). Выбор горизонтов для анализа вертикального распределения гидрофизических параметров определялся глубинами установки измерительных приборов на MRB-станциях. В данной работе анализировались следующие данные: 13 горизонтов по температуре (на 1, 10, 13, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180, 300 и 500 метрах); 6 горизонтов по солености (на 1, 10, 20, 40, 60 и 100 метрах) и 1 горизонт (10 метров) по зональной компоненте вектора течений. Схема расположения станций RAMA в 2018 г. представлена на рис. 1. На этой же схеме выделены буи, которые были отобраны для дальнейшего исследования. Выбор именно этих MRB-станций для анализа был обусловлен следующими причинами:

1) близость к 11°–12° ю.ш. Так как по данным ре-анализа ORAS5 критический слой был обнаружен в области, ограниченной координатами 11°–12° ю.ш., то наибольший интерес представляли буи, расположенные именно в этой зоне. Таких станций оказалось всего четыре. Их координаты: 55° в.д. 12° ю.ш., 67° в.д. 12° ю.ш., 80,5° в.д. 12° ю.ш. и 93° в.д. 12° ю.ш. Как видно из рис. 1, другие, ближайшие к указанному широтному поясу станции, расположены на 8° ю.ш. и 16° ю.ш., то есть они удалены от него на значительное расстояние (более, чем на 440 км.). Поэтому эти и другие станции, расположенные еще дальше от интересующего нас широтного интервала, были исключены из выборки и не анализировались в работе;

2) совпадение с узлами сетки ре-анализов (или, хотя бы, части из них) и по долготе, и по широте. Во избежание увеличения погрешности при интерполяции из списка станций была исключена станция, установленная на 12° ю.ш. и 80,5° в.д., так как ее расположение не совпадало с узлами сетки всех трех ре-анализов. В результате такого отбора осталось всего три буя с координатами 55° в.д. 12° ю.ш., 67° в.д. 12° ю.ш. и 93° в.д. 12° ю.ш. Данные именно этих станций будут использоваться в дальнейшей работе.

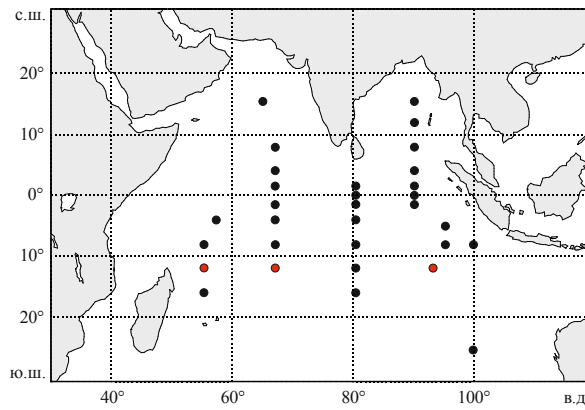


Рис. 1. Схема расположения MRB-станций исследовательского массива для анализа и прогнозирования Африкано-азиатско-австралийских муссонов (RAMA) в 2018 г. Красным цветом отмечены буи, данные которых используются в настоящей работе

Fig. 1. Scheme of the MRB stations of the Research Moored Array for African – Asian – Australian Monsoon Analysis and Prediction (RAMA) for 2018. The buoys used in this work are marked in red color

Так как даже после отбора по вышеперечисленным критериям координаты выбранных станций в точности не совпадали с узлами ре-анализа ORAS5 (сдвиг по широте составил $0,5^\circ$) использовался метод линейной интерполяции. С помощью этого метода вычислялись значения исследуемых величин между двумя соседними узлами ре-анализа в новом узле, совпадающем с расположением буя. Использование именно такого количества точек было обусловлено тем, что при анализе средних величин не было обнаружено существенной разницы значений параметров между ближайшими узлами. Это видно и из рис. 2, на котором продемонстрированы изменения величин потенциальной температуры, солености и зональной компоненты

скорости течений на горизонте 10 м в узлах сетки ре-анализа ORAS5 на $11,5^\circ$ ю.ш. и $12,5^\circ$ ю.ш. для 55° в.д. Такой результат можно объяснить тем, что выбранные станции находятся в зоне действия достаточно устойчивого по времени и протяженного как по широте, так и по долготе Южного Пассатного течения. Это течение обычно описывается [10–12], как поток с шириной приблизительно в 10° , расположенный между 10° ю.ш. и 20° ю.ш. и распространяющийся (в среднем за год) на запад через весь бассейн Индийского океана. Кроме того, метод линейной интерполяции применялся для совмещения горизонтов данных ре-анализов с горизонтами инструментальных измерений.

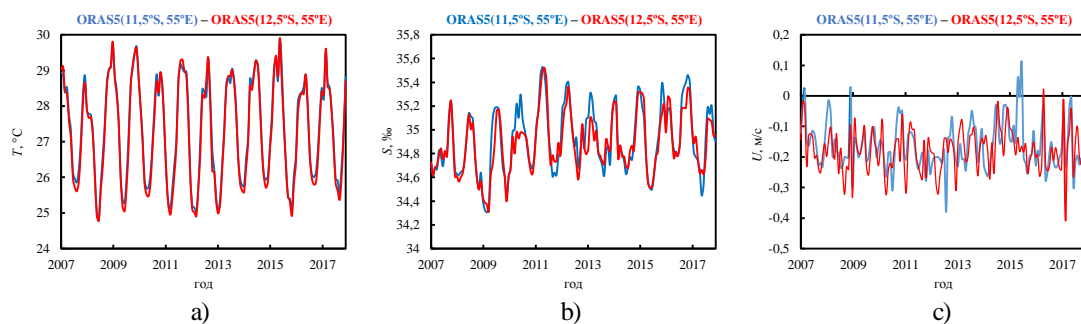


Рис. 2. Графики изменения среднемесячных величин потенциальной температуры T ($^\circ\text{C}$) – а), солености S (‰) – б) и зональной компоненты вектора течений U (м/с) – в) в двух узлах сетки ре-анализа ORAS5 с координатами $11,5^\circ$ ю.ш. 55° в.д. (синий) и $12,5^\circ$ ю.ш. 55° в.д. (красный) на глубине 10 м

Fig. 2. Plots of changes in monthly average values of potential temperature T ($^\circ\text{C}$) – a), salinity S (‰) – b) and zonal component of current velocity U (m/s) – c) for two nodes of the ORAS5 reanalysis grid with coordinates $11,5^\circ\text{S}$, 55°E (blue) and $12,5^\circ\text{S}$, 55°E (red) at 10 m depth

После проведения описанной интерполяции был проанализирован временной ход гидрофизических параметров на предмет регулярности измерений. В виду того, что используемые в работе результаты ре-анализов представляют собой сведения об изменении среднемесячных значений гидрофизических параметров, а результаты инструментальных данных – ежесуточные наблюдения этих параметров, из данных RAMA были исключены те из них, что покрывали менее 90% месяца. Результаты ре-анализов за такие месяцы тоже не участвовали в сравнении. В итоге были полностью исключены данные до 2013 г. и был выбран период с максимальным временным покрытием с 2013 по 2018 гг. Далее были выполнены следующие операции:

1) выгрузка из массива RAMA ежесуточных значений потенциальной температуры $T_{cym.}^R$, солёности $S_{cym.}^R$ и зональной компоненты скорости течений $U_{cym.}^R$ на всех горизонтах выбранных MRB-станций за период 2013–2018 гг.; приведение этих величин к среднемесячным значениям по стандартной процедуре

$$\bar{T}_{мес.}^R = \frac{T_{cym.1}^R + T_{cym.2}^R + \dots + T_{cym.n}^R}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{S}_{мес.}^R = \frac{S_{cym.1}^R + S_{cym.2}^R + \dots + S_{cym.n}^R}{n}, \quad (2)$$

$$\bar{U}_{мес.}^R = \frac{U_{cym.1}^R + U_{cym.2}^R + \dots + U_{cym.n}^R}{n}, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений за месяц;

2) вычисление для каждой из трех станций RAMA и соответствующих им узлов ре-анализов ORAS5, SODA3 и GLORYS средних значений потенциальной температуры ($\bar{T}^R, \bar{T}^O, \bar{T}^S, \bar{T}^G$) солёности ($\bar{S}^R, \bar{S}^O, \bar{S}^S, \bar{S}^G$) и зональной компоненты скорости течений ($\bar{U}^R, \bar{U}^O, \bar{U}^S, \bar{U}^G$) за период 2013–2018 гг. путем расчета отношения суммы их среднемесячных значений к числу месяцев (m), покрытых суточными наблюдениями не менее, чем на 90%. Например, для \bar{T}^R :

$$\bar{T}^R = \frac{T_{мес.1}^R + T_{мес.2}^R + \dots + T_{мес.m}^R}{m}, \quad (4)$$

и, наконец, осреднение полученных ранее значений по всем трем станциям и соответствующим им узлам ре-анализов за весь период наблюдений

$$\langle \bar{T} \rangle^R, \langle \bar{T} \rangle^O, \langle \bar{T} \rangle^S, \langle \bar{T} \rangle^G, \langle \bar{S} \rangle^R, \langle \bar{S} \rangle^O, \langle \bar{S} \rangle^S, \langle \bar{S} \rangle^G, \langle \bar{U} \rangle^R, \langle \bar{U} \rangle^O, \langle \bar{U} \rangle^S, \langle \bar{U} \rangle^G;$$

3) сравнение инструментальных измерений и данных ре-анализов путем анализа отношения среднемесячных значений потенциальной температуры, солёности и зональной компоненты вектора течений к соответствующим данным ре-анализов

$$(\bar{T}^{R/O}, \bar{T}^{R/S}, \bar{T}^{R/G}, \bar{S}^{R/O}, \bar{S}^{R/S}, \bar{S}^{R/G}, \bar{U}^{R/O}, \bar{U}^{R/S}, \bar{U}^{R/G})$$

за весь период для каждой станции и узла сетки, например, для $\bar{T}^{R/O}$:

$$\bar{T}^{R/O} = \frac{\bar{T}^R}{\bar{T}^O}, \quad (5)$$

а также сравнение этих величин осредненных по всем трем станциям и по соответствующим им узлам ре-анализов

$$\langle \bar{T} \rangle^{R/O}, \langle \bar{T} \rangle^{R/S}, \langle \bar{T} \rangle^{R/G}, \langle \bar{S} \rangle^{R/O}, \langle \bar{S} \rangle^{R/S}, \langle \bar{S} \rangle^{R/G}, \langle \bar{U} \rangle^{R/O}, \langle \bar{U} \rangle^{R/S}, \langle \bar{U} \rangle^{R/G}.$$

Полученные результаты. На рис. 3 представлен пример сравнения полученных с помощью ре-анализов ORAS5, GLORYS и SODA3 величин потенциальной температуры, солёности и зональной скорости течений с данными RAMA в точке с координатами 12° ю.ш. 55° в.д. для отдельных горизонтов. Можно отметить, что данные ре-анализов хоть в целом и совпадают с инструментальными данными (как по порядку величин, так и по характеру временной изменчивости), в отдельные месяцы заметны существенные различия между ними. Хорошо видно, например, что в июле 2015 г. различия в среднемесячной потенциальной температуре между ре-анализом SODA3 и прямыми измерениями достигали почти 3°C. Для зональной компоненты вектора течений различия между измеренными и рассчитанными величинами хорошо видны для всех трех ре-анализов. В частности, это касается ре-анализа GLORYS, в котором в марте 2013 г. получено расхождение со среднемесячными данными прямых измерений на буре вплоть до смены знака.

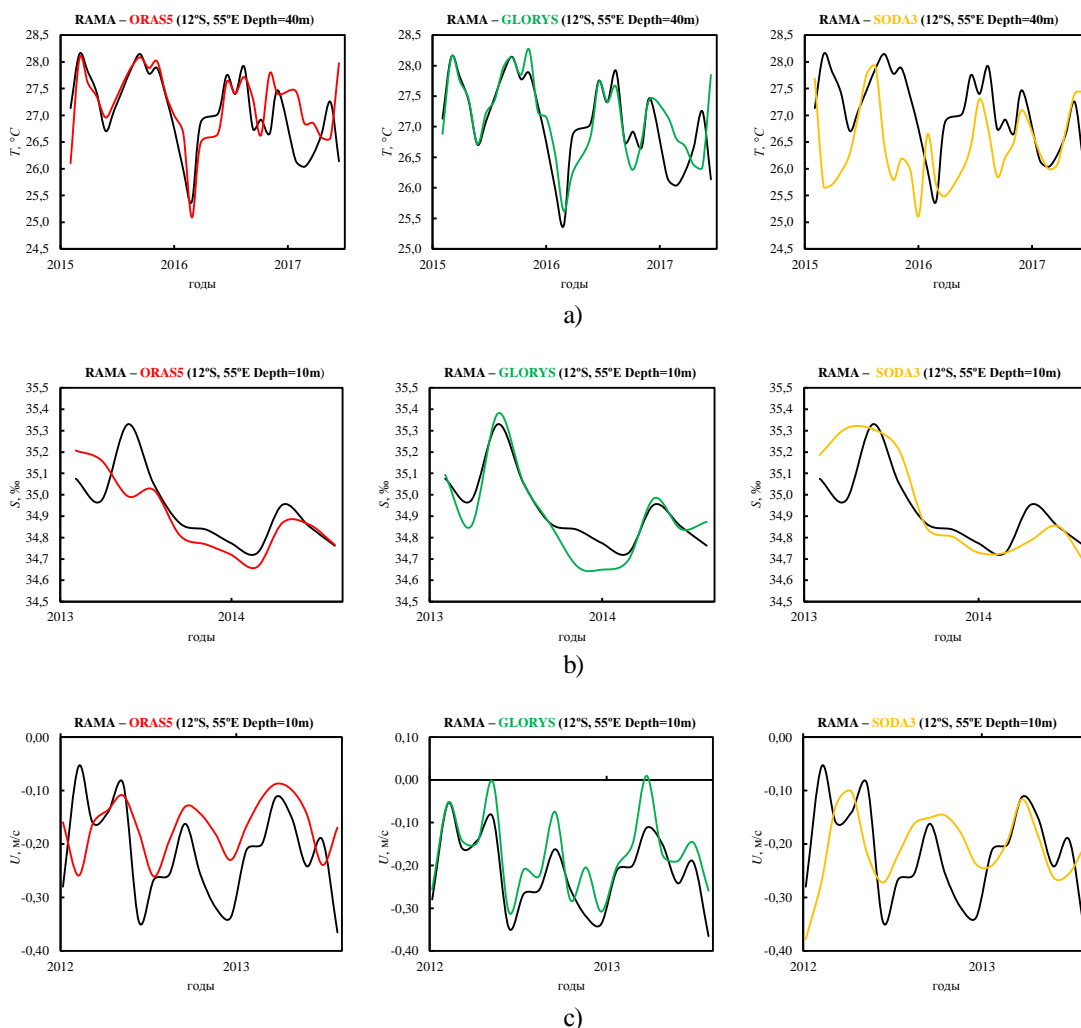


Рис. 3. Изменения среднемесячных величин потенциальной температуры T (°C) – а), солёности S (‰) – б) (горизонт 40 м) и зональной компоненты вектора течений U (м/с) – с) (горизонт 10 м) на станции RAMA (чёрным цветом) и по данным ре-анализов: ORAS5 (красный), GLORYS (зеленый) и SODA3 (желтый) в точке с координатами 12° ю.ш., 55° в.д. Знак минус соответствует направлению течения на запад

Fig. 3. Plots of monthly average values of potential temperature T (°C) – a), salinity S (‰) – б) (at 40 m depth) and zonal component of current velocity U (m/s) – с) (at 10 m depth) at the RAMA (black) buoy, at the ORAS5 (red), GLORYS (green) and SODA3 (yellow) re-analysis grid node with coordinates 12°S , 55°E . The minus sign corresponds to the westward current

В целом, даже из такого анализа, имеющего в основном иллюстративный характер, видно, что из всех выбранных гидрофизических параметров хуже всего в данной области ре-анализами описывается зональная скорость течений, что достаточно типично и для других регионов Мирового океана [13–14].

Сравним более детально данные по потенциальной температуре из ре-анализов с реальными инструментальными наблюдениями на каждой станции и горизонте. Из табл. 1, видно, что для станций с координатами 12° ю.ш., 55° в.д. и 12° ю.ш., 93° в.д.

разница между измеренными и осредненными за месяц величинами и данными ре-анализов в среднем гораздо меньше, чем на станции с координатами 12° ю.ш., 67° в.д. Следует отметить, что наименьшая разница между реальными величинами наблюдается у поверхности (на горизонте 1 м). Вероятнее всего, такой результат связан с большим вкладом спутниковых наблюдений во входные данные, используемые для усвоения. Для выявления «лучшего» ре-анализа по потенциальной температуре рассмотрим табл. 2, в которой приведены усредненные данные по всем трем станциям и горизонтам.

Видно, что в целом все три ре-анализа хорошо воспроизводят распределение температуры по глубине. У поверхности и на горизонтах 300 и 500 м расхождение с практически наблюдениями не превышает 1–2%. На глубинах 100 и 140 м у всех ре-анализов

наблюдаются небольшие превышения значений потенциальной температуры, с максимумом в 9% для ре-анализа ORAS5. Меньше всего различий с реальными инструментальными наблюдениями на каждой станции и горизонте у ре-анализа SODA3.

Таблица 1. Среднегодовое значения потенциальной температуры, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, GLORYS и SODA3 в точках расположения трех MRB-станций за период 2013–2018 гг. на горизонтах 1, 40, 100, 140, 300, 500 м; отношения среднегодовых значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Среднегодовое температуры, °C				Отношение температур		
		\bar{T}^R	\bar{T}^O	\bar{T}^G	\bar{T}^S	$\bar{T}^{R/O}$	$\bar{T}^{R/G}$	$\bar{T}^{R/S}$
12° ю.ш. 55° в.д.	1	27.79	27.72	27.72	27.53	1.00	1.00	1.01
	40	27.07	27.21	27.15	26.44	1.00	1.00	1.02
	100	21.58	22.62	22.19	20.30	0.95	0.97	1.06
	140	17.74	18.72	18.36	17.29	0.95	0.97	1.03
	300	11.59	11.50	11.57	11.66	1.01	1.00	0.99
	500	8.68	8.95	8.69	8.99	0.97	1.00	0.97
12° ю.ш. 67° в.д.	1	28.25	27.40	27.34	27.43	1.03	1.03	1.55
	40	26.66	26.91	26.79	26.85	0.99	1.00	1.30
	100	17.89	21.19	21.42	20.56	0.84	0.84	1.14
	140	15.35	18.16	18.15	17.53	0.85	0.85	1.15
	300	11.37	11.84	12.09	11.80	0.96	0.94	1.51
	500	9.08	8.56	8.75	8.61	1.06	1.04	1.38
12° ю.ш. 93° в.д.	1	27.79	27.72	27.72	27.79	1.00	1.00	1.00
	40	27.07	27.21	27.15	27.13	1.00	1.00	1.00
	100	21.58	22.62	22.19	21.83	0.95	0.97	0.99
	140	17.74	18.72	18.36	17.96	0.95	0.97	0.99
	300	11.59	11.50	11.57	11.44	1.01	1.00	1.01
	500	8.68	8.95	8.69	8.64	0.97	1.00	1.00

Таблица 2. Осредненные по трем MRB-станциям среднегодовое значения потенциальной температуры, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, SODA3 и GLORYS за период 2013–2018 гг. на горизонтах 1, 40, 100, 140, 300, 500 м; отношения среднегодовых значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Осредненные среднегодовое температуры, °C				Отношение осредненных среднегодовых температур		
		$\langle \bar{T} \rangle^R$	$\langle \bar{T} \rangle^O$	$\langle \bar{T} \rangle^G$	$\langle \bar{T} \rangle^S$	$\langle \bar{T} \rangle^{R/O}$	$\langle \bar{T} \rangle^{R/G}$	$\langle \bar{T} \rangle^{R/S}$
12° ю.ш. 55°, 67°, 93° в.д.	1	27.95	27.62	27.60	27.58	1.01	1.01	1.01
	40	26.94	27.11	27.03	26.81	0.99	1.00	1.00
	100	20.35	22.15	21.94	20.90	0.92	0.93	0.98
	140	16.94	18.53	18.29	17.59	0.91	0.92	0.96
	300	11.51	11.61	11.74	11.63	0.99	0.98	0.99
	500	8.82	8.82	8.71	8.75	1.00	1.01	1.01

Перейдем к анализу качества воспроизведения характеристик солёности различными ре-анализами. Табл. 3 и 4 дают представления о соответствии средних величин солёности в ре-

анализах и массиве RAMA на трех станциях. Можно отметить, что среднеголетняя соленость в целом неплохо описывается данными ре-анализов.

Таблица 3. Среднеголетние величины солености, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, GLORYS и SODA3 в точках расположения трех MRB-станций за период 2013–2018 гг. на горизонтах 1, 10, 20, 40, 60, 100 м; отношения среднеголетних значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Среднеголетняя соленость, ‰				Отношение солености		
		\bar{S}^R	\bar{S}^O	\bar{S}^G	\bar{S}^S	$\bar{S}^{R/O}$	$\bar{S}^{R/G}$	$\bar{S}^{R/S}$
12° ю.ш. 55° в.д.	1	34.97	34.88	34.90	34.94	1.00	1.00	1.00
	10	34.93	34.89	34.90	34.95	1.00	1.00	1.00
	20	34.90	34.90	34.92	34.96	1.00	1.00	1.00
	40	35.03	34.95	35.03	35.02	1.00	1.00	1.00
	60	35.13	35.02	35.08	35.10	1.00	1.00	1.00
	100	35.23	35.18	35.19	35.18	1.00	1.00	1.00
12° ю.ш. 67° в.д.	1	34.75	34.70	34.71	34.86	1.00	1.00	1.00
	10	34.74	34.70	34.70	34.72	1.00	1.00	1.00
	20	34.85	34.69	34.74	34.75	1.00	1.00	1.00
	40	34.89	34.83	34.83	34.82	1.00	1.00	1.00
	60	35.01	34.96	34.99	34.97	1.00	1.00	1.00
	100	35.09	35.06	35.07	35.06	1.00	1.00	1.00
12° ю.ш. 93° в.д.	1	34.15	34.28	34.21	34.14	1.00	1.00	1.00
	10	34.39	34.32	34.34	34.26	1.00	1.00	1.00
	20	34.26	34.29	34.26	34.19	1.00	1.00	1.00
	40	34.38	34.33	34.37	34.33	1.00	1.00	1.00
	60	34.53	34.44	34.53	34.46	1.00	1.00	1.00
	100	34.76	34.56	34.67	34.63	1.01	1.00	1.00

Таблица 4. Осредненные по трем MRB-станциям среднеголетние значения солености, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, SODA3 и GLORYS за период 2013–2018 гг. на горизонтах 1, 10, 20, 40, 60, 100 м; отношения среднеголетних значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Осредненная среднеголетняя соленость, ‰				Отношение осредненной среднеголетней солености		
		$\langle \bar{S} \rangle^R$	$\langle \bar{S} \rangle^O$	$\langle \bar{S} \rangle^G$	$\langle \bar{S} \rangle^S$	$\langle \bar{S} \rangle^{R/O}$	$\langle \bar{S} \rangle^{R/G}$	$\langle \bar{S} \rangle^{R/S}$
12° ю.ш. 55°, 67°, 93° в.д.	1	34.62	34.62	34.61	34.65	1.00	1.00	1.00
	10	34.69	34.64	34.65	34.64	1.00	1.00	1.00
	20	34.67	34.63	34.64	34.63	1.00	1.00	1.00
	40	34.77	34.70	34.74	34.72	1.00	1.00	1.00
	60	34.89	34.81	34.86	34.84	1.00	1.00	1.00
	100	35.03	34.93	34.98	34.96	1.00	1.00	1.00

Из табл. 4 видно, что осредненные по всем выбранным станциям среднеголетние данные ре-анализов по солености с высокой степенью точности совпадают с реальными инструментальными наблюдениями при соответствующем осреднении.

Для сравнения средних значений зональ-

ной компоненты вектора течения в ре-анализах и массиве RAMA обратимся к табл. 5 и 6. Из табл. 5 видно, что все ре-анализы во всей анализируемой области демонстрируют тенденцию к занижению расчетной величины зональной скорости на глубине 10 м. Наиболее близкие к измеренным и

осредненным величинам зональной компоненты вектора течений получены в точке с координатами 12° ю.ш. 67° в.д., в которой соответствующая разница не превышает 5%.

Для других станций разница может достигать 31%. Ре-анализ ORAS5 в целом меньше других занижает величину средней зональной скорости.

Таблица 5. Среднеголетние величины зональной компоненты вектора течений, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, GLORYS и SODA3 в точках расположения трех MRB-станций за период 2013–2018 гг. на горизонте 10 м; отношения среднеголетних значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Среднеголетняя зональная компонента скорости, м/с				Отношение среднеголетней зональной компоненты скорости		
		\bar{U}^R	\bar{U}^O	\bar{U}^G	\bar{U}^S	$\bar{U}^{R/O}$	$\bar{U}^{R/G}$	$\bar{U}^{R/S}$
12° ю.ш. 55° в.д.	10	-21.8	-16.6	-17.5	-20.6	1.31	1.24	1.06
12° ю.ш. 67° в.д.	10	-16.1	-16.7	-15.6	-12.8	0.98	1.05	1.02
12° ю.ш. 93° в.д.	10	-15.0	-13.8	-12.5	-12.2	1.09	1.20	1.23

Таблица 6. Осредненные по трем MRB-станциям среднеголетние значения зональной компоненты скорости течений, полученные из массива RAMA, и данных ре-анализов ORAS5, SODA3 и GLORYS за период 2013–2018 гг. на горизонте 10 м; отношения среднеголетних значений прямых наблюдений к соответствующим данным ре-анализов

Координаты	Глубина	Осредненная среднеголетняя зональная компонента вектора скорости, м/с				Отношение осредненной среднеголетней зональной компоненты вектора скорости		
		$\langle \bar{U} \rangle^R$	$\langle \bar{U} \rangle^O$	$\langle \bar{U} \rangle^G$	$\langle \bar{U} \rangle^S$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/O}$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/G}$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/S}$
12° ю.ш. 55°, 67°, 93° в.д.	10	-17.6	-15.7	-15.2	-15.2	1.12	1.16	1.16

Заключение. Таким образом, сравнение данных ре-анализов и прямых наблюдений на заякоренных буях показало, что ре-анализы ORAS5, SODA3 и GLORYS хорошо описывают реальную термохалинную структуру в Индийском океане в местах расположения выбранных MRB-станций, немного (до 9% для ORAS5) завышая данные по потенциальной температуре на глубинах 100 и 140 м. Осредненные по трем станциям данные ре-анализов по солености совпали с реальными инструментальными наблюдениями при соответствующем осреднении. Анализ величин зональной компоненты вектора течений выявил общую для всех ре-анализов тенденцию к занижению скорости. Для ре-анализа GLORYS и SODA3 занижение в среднем достигало 16%. Наименьшим занижением зональной компоненты вектора те-

чений (в среднем около 12%) характеризуются данные ре-анализа ORAS5.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе ре-анализа, данные которого максимально близки к реальным наблюдениям. Это важно, например, при изучении механизмов генерации ИД. Действительно даже небольшое отличие данных ре-анализа с реальной величиной зональной скорости, а также неточности вертикального распределения температуры и солености может привести к неверной идентификации критического слоя, в котором фазовая скорость планетарных волн равна скорости течений в зональном направлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamagata T., Behera S.K., Rao S A. et al. Comments on "Dipoles, Temperature Gradient, and Tropical Climate Anomalies" // Bull. Amer. Met. Soc. 2003. № 84 (10). P.1418–1422. DOI: 10.1175/BAMS-84-10-1418
2. Полонский А.Б., Торбинский А.В. Роль зональных течений и планетарных волн в распространении термических аномалий в экваториально-тропической зоне Индийского океана // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 6. С. 35–44.
3. Полонский А.Б., Торбинский А.В., Губарев А.В. Идентификация механизмов формирования Индоокеанского диполя // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 2 (40). С. 13–18. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-2-13-18
4. Полонский А.Б., Торбинский А.В. Критический слой в экваториально-тропической зоне и Индоокеанский диполь // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 2 (36). С. 88–92. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-88-92
5. Guo F., Liu Q., Sun S., Yang, J. Three Types of Indian Ocean Dipoles // J. Climate. 2015. Vol. 28 (8). P. 3073–3092. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00507.1
6. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/> (дата обращения: 10.05.2020).
7. <https://www2.atmos.umd.edu/~ocean/> (дата обращения: 12.05.2020).
8. <https://www.mercator-ocean.fr/en/science-publications/glorys/> (дата обращения: 14.05.2020).
9. <https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/> (дата обращения: 10.05.2020).
10. Schott F.A., McCreary J.P. The Monsoon Circulation of the Indian Ocean // Progress in Oceanography. 2001. Vol. 51 (1). P. 1–123. DOI: 10.1016/S0079-6611(01)00083-0
11. Shenoi S.S.C., Saji P.K. Near-surface circulation and kinetic energy in the tropical Indian Ocean derived from Lagrangian drifters // Journal of Marine Research. 1999. № 57. P. 885–907. DOI: 10.1357/002224099321514088
12. Cutler A.N., Swallow J.C. Surface currents of the Indian Ocean. (To 25°S, 100°E). I. O. S. // Technical Rept. 1984, 187.
13. Pandey V.K., Singh S.K. Comparison of ECCO2 and NCEP reanalysis using TRITON and RAMA data at the Indian Ocean Mooring Buoy point // Open access e-Journal Earth Science India. 2010. Vol. 3 (IV). P. 226–241. eISSN: 0974 – 8350
14. Wang J., Mao K., Chen X. Assessment of several ocean reanalyzes about North 2 Equatorial Current at 160°E // Mar. Sci. Eng. 2020. 8. P. 1–7. DOI: 10.1080/1755876X.2020.1737345

VERIFICATION OF REANALYSIS DATA FOR THE TROPICAL ZONE OF THE INDIAN OCEAN. PART 1: MULTI-YEAR HYDROPHYSICAL AVERAGES

A.B. Polonsky, A.V. Torbinskii, A.V. Gubarev

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The aim of the study is to evaluate the performance of ORAS5/SODA3/GLORYS re-analyses using the RAMA in the tropical Indian Ocean. Data on potential temperature, salinity and zonal component of the current vector for the period 2007–2018 south of the equator for comparing multi-year hydrophysical averages calculated from the re-analyses and in-situ observations on buoys are used. It is shown that the ORAS5, GLORYS, and SODA3 reanalyzes equally well reproduce the data on potential temperature and salinity on RAMA buoys at 12°S. The average values of the velocities of zonal currents in all three reanalyzes are lower than the observed values by 2 to 31%. In general, ORAS5 is best of all.

Keywords: RAMA, SODA3, ORAS5, GLORYS, critical layer, Indian Ocean dipole.