

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ФРОНТОВ В ТРОПИЧЕСКИХ И УМЕРЕННЫХ ШИРОТАХ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипальева,
А.В. Федирко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: artam-ant.yandex.ru

На основе современных баз спутниковых и контактных измерений анализируются структура и сезонная изменчивость крупномасштабных геострофических течений и гидрологических фронтов на поверхности Индийского океана в тропических и умеренных широтах. Обсуждаются особенности формирования фронтов в поле солености в связи с крупномасштабной изменчивостью структуры вод Индийского океана.

Введение. Анализ изученности гидрологических полей Индийского океана показал, что, несмотря на огромное количество исследований, посвященных этой тематике, существуют спорные вопросы, требующие специального обсуждения. Существует неоднозначность в названии гидрологических фронтов, критериев их выделения. Эти противоречия возникают из-за того, что преобладающая часть исследований выполнена на основе данных конкретных экспедиций [1 – 4]. Кроме того, существуют неоднозначные взгляды на общую схему циркуляции вод и ее изменчивость [4 – 7], с которой тесным образом связана изменчивость крупномасштабных фронтов. В данной работе на основе современных массивов спутниковых и контактных измерений проводится анализ структуры геострофических течений и гидрологических фронтов в умеренных и тропических широтах Индийского океана. Такой комплексный подход позволит минимизировать существующие противоречия и достичь более глубокого понимания особенностей сезонной изменчивости фронтов.

Материалы и методика. В качестве исходных данных использованы: массив среднемесячных значений температуры

и солености в узлах одноградусной сетки на стандартных горизонтах Мировой климатической базы гидрологических данных (*World Ocean Atlas*, 2009) [7]; массив спутниковых измерений температуры на поверхности океана (ТПО) в узлах сетки 54×54 км (архив *AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA*, 1986 – 2002 гг.) [8]; климатический массив среднемесячных значений аномалий уровня океана (АУО) в узлах регулярной сетки с шагом $1/3^\circ$ за декабрь 1992 – март 2010 гг. [9]. Подробно методики выделения крупномасштабных фронтов, расчета геострофических течений и анализа их сезонной изменчивости приводятся в работах [10, 11].

В данной работе рассматриваются течения и фронты в открытых районах Индийского океана, где они носят преимущественно зональный характер. Поэтому анализируются распределения и изменчивость зональной составляющей скорости течений (U_0), меридиональных градиентов температуры (МГТ) и солености (МГС).

При идентификации течений и фронтов использовались названия, приведенные в работах [1 – 6, 10, 12]. В тех случаях, когда выделенные фронты и течения ранее не упоминались в литературных источниках по Индийскому океану, названия им давались в соответствии с аналогами в других океанах [10, 12] или вводилась новая номенклатура.

Необходимо отметить, что в некоторых районах Индийского океана контактные гидрологические измерения крайне редки. Особенно слабая обеспеченность отмечается для измерений солености, которых, по крайней мере, на порядок меньше, чем спутниковых измерений АУО и ТПО. Поэтому сезонные особенности течений и фронтов в этих районах на основе среднемесячных гидрологических данных необходимо рассматривать как предварительные оценки.

Другой проблемой, возникающей при изучении сезонного цикла фронтов на поверхности океана, является некоторый субъективизм при идентификации того или иного экстремума МГТ, проявляющегося по спутниковым данным. Решить эту вопрос можно было бы с помощью анализа подповерхностных гид-

рологических данных с высоким пространственно-временным разрешением. К сожалению, в настоящее время таких данных крайне мало.

Анализ результатов. На рис. 1 представлены графики внутригодовой изменчивости зональной скорости течений U_0 , МГТ и МГС вдоль 60° в.д. В тропических и умеренных широтах выделяются следующие элементы зональной циркуляции. В северных тропиках в Аравийском море прослеживаются:

Оманское (ОмТ), Аравийское восточное течения (АрВТ), Западное и Восточное муссонные течения (ЗМусТ, ВМусТ) (рис. 1, а). Южнее экватора выделяются Южное экваториальное противотечение (ЮЭПТ), Южное пассатное течение (ЮПТ), Южно-Индоокеанское течение (ЮИТ). Южнее этих течений наблюдается система струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ). Полярные течения подробно анализируются в работе [12].

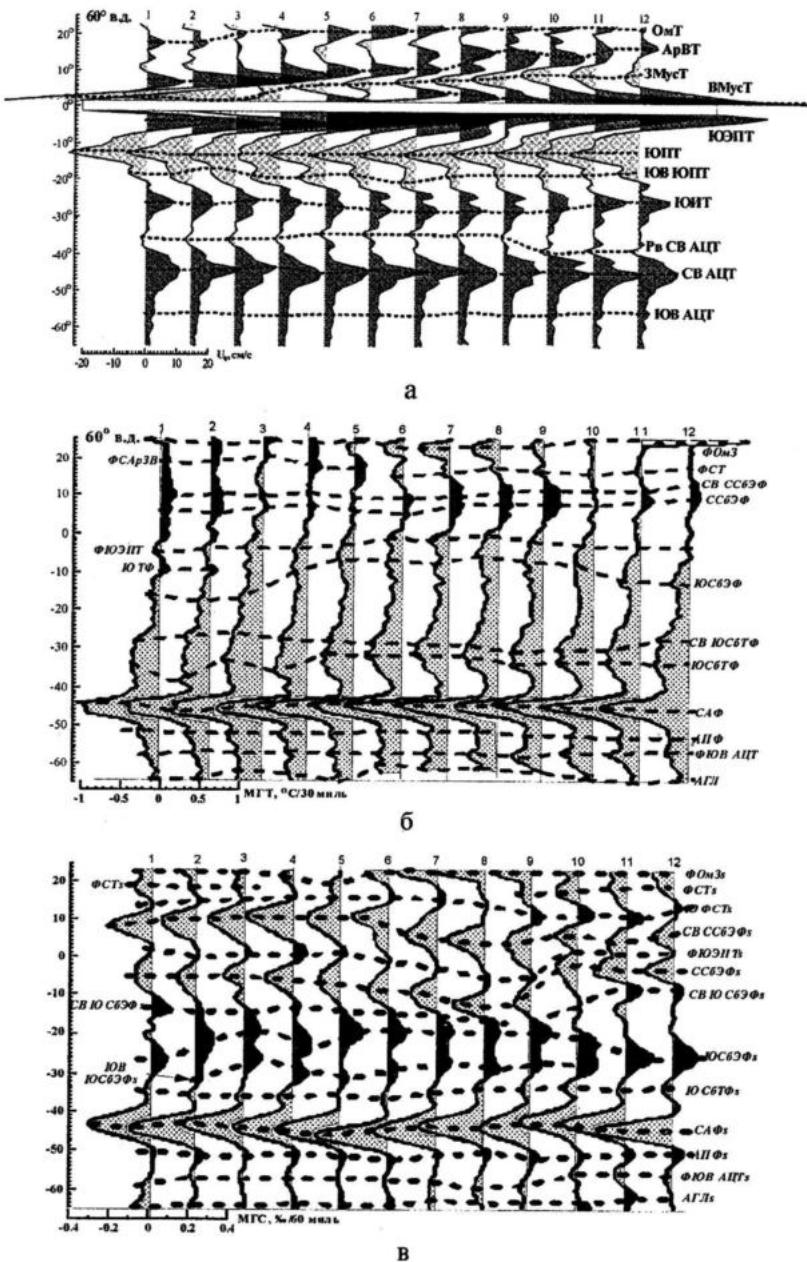


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость U_0 (а), МГТ (б) и МГС (в) вдоль 60° в.д.

В общем случае особенности меридионального распределения геострофи-

ческих скоростей находят свое отражение в распределениях экстремумов МГТ

и МГС. Так, например, на широте примерно 45° ю.ш., где располагается Северная ветвь АЦТ, наблюдаются значительные отрицательные значения МГТ и МГС, которые характерны для Субантарктического фронта (САФ). Такое хорошее совпадение экстремумов по разным параметрам прослеживается не всегда, что может быть связано как с физическими причинами, так и разной обеспеченностью различных массивов. Вероятно, этим можно объяснить слабую связь между температурными и соленостными фронтами южнее 50° ю.ш., где данных по солености крайне мало.

В умеренных и тропических широтах, контактных измерений значительно больше, поэтому особенности распределения U_0 и МГТ и МГС представляются более достоверными.

Структура течений и фронтов в северных тропиках. В зоне Оманского течения отмечаются экстремальные значения МГТ – **Фронт Оманского залива** (ФОМЗ). В конце и в первую половину года они положительны, что обусловлено интенсивным охлаждением прибрежных вод зимой Северного полушария. В середине года ОмТ усиливается (рис. 2, а), значения МГТ также увеличиваются и становятся отрицательными (рис. 2, б). Это свидетельствует о том, что летом прибрежные воды заметно теплее, чем в открытой части Аравийского моря.

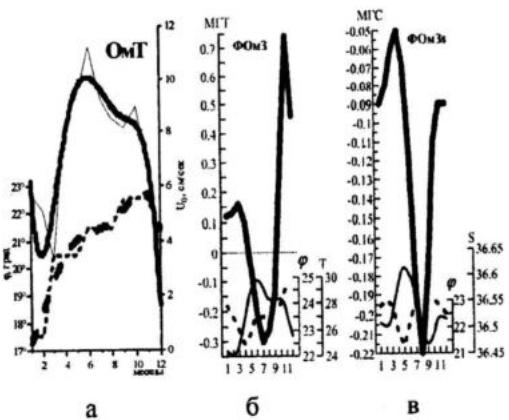


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость характеристик ОМТ (а), ФОМЗ в полях ТПО (б) и СПО (в). Жирные кривые – величины U_0 , МГТ и МГС, штриховые линии – положение стрежня ОМТ (а) и оси ФОМЗ (б, в), тонкие линии – величины температуры и солености на оси ФОМЗ (б, в)

В поле солености в зоне ОМТ наблюдаются отрицательные значения МГС (рис. 2, в). Летом поверхностные воды в Оманском заливе за счет интенсивного испарения осолоняются и МГС увеличиваются, отмечается также усиление ОМТ и ФОМЗ в поле температуры.

Следующими крупномасштабными элементами циркуляции в Аравийском море являются АрВТ и ЗМусТ, которые в сезонном цикле смещаются на север соответственно от 7° до 17° с.ш. и от 3° до 10° с.ш. (рис. 1, а). В начале года на $17 - 18^{\circ}$ с.ш. выделяется еще одна струя восточного направления, которая смещается на север и ослабевает. Эту ветвь можно рассматривать, как разрушающееся АрВТ предшествующего года. В апреле-мае северная ветвь АрВТ сливалась с ОМТ. Аналогичная картина наблюдается и для ЗМусТ. Его разрушающаяся ветвь предшествующего сезонного цикла прослеживается около 10° с.ш. в начале года и затем она, смещаясь на север, ослабевает, практически исчезая в августе. Ближе к экватору проходит ВМусТ, которое мало изменяет свое широтное положение. Максимальной интенсивности оно достигает в конце года.

В зонах АрВТ, ЗМусТ и ВМусТ в поле ТПО выделено несколько фронтов, каждый из которых имеет свой механизм формирования. Зимой-весной примерно между 15° и 20° с.ш. наблюдаются положительные значения МГТ, которые характеризуют южную границу зимних аравийских вод. Эта граница была названа **Фронтом северных аравийских зимних вод** (ФСАрЗВ). В начале года ось ФСАрЗВ располагается севернее стрежня АрВТ (рис. 3, а, б). Летом-осенью, когда АрВТ смещается на север, оно переносит холодные воды из района Сомалийского течения, продолжением которого является. На горизонтальных распределениях ТПО этот поток проявляется в виде языка холодных вод, вытянутого с юго-запада. На северной границе этого потока ($16 - 19^{\circ}$ с.ш.) наблюдается зона отрицательных градиентов ТПО, которая идентифицирована как **Фронт Сомалийского течения** (ФСТ).

В поле солености распресненные воды, приносимые из района Сомалийского течения, на широте примерно $17 - 19^{\circ}$

с.ш. отделяются от северных более соленых аравийских вод отрицательным экстремумом МГС, который также назван **Фронтом сомалийского течения** (ФСТ). Наиболее четко он выражен осенью, примерно на месяц-два позже относительно времени усиления ФСТ в поле ТПО (рис. 3, в). С юга в широтной полосе $8 - 16^{\circ}$ с.ш. воды Сомалийского течения также ограничены соленостным фронтом с положительными значениями МГС. Он был выделен как самостоятельный **Южный фронт сомалийского течения** (ЮФСТ). Этот фронт отделяет воды Сомалийского течения от соленых северных аравийских вод, которые выносятся ЗМусТ в юго-западном направлении. Наибольшее обострение ЮФСТ отмечается осенью, когда АрВТ и ЗМусТ находятся в северном положении.

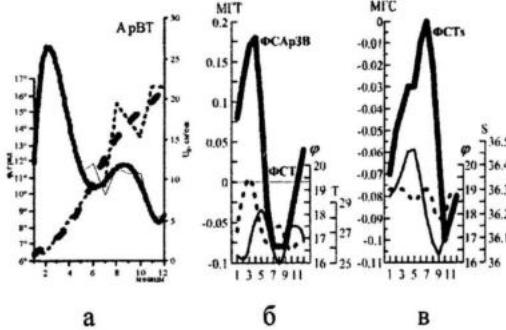


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для АрВТ (а) и ФСАрЗВ (ФСТ) в полях ТПО (б) и СПО (в)

В полосе примерно $2 - 14^{\circ}$ с.ш., где проходит ЗМусТ, преобладают положительные значения МГТ, которые идентифицируются как **Северный субэкваториальный фронт** (ССБЭФ). Отмечается формирование двух ветвей этого фронта. В интенсивности основной **Северной ветви** фронта и положении границы положительных значений МГТ наблюдается полугодовой сигнал. В начале года, когда ЗМусТ занимает крайнее южное положение, эта граница располагается южнее экватора, при этом СВ ССБЭФ усиливается. В конце лета-осенью, когда ЗМусТ смещается на север, южная граница СВ ССБЭФ снова смещается на юг, захватывая зону ВМусТ, а градиенты во фронте снова заметно увеличиваются (рис. 4, а, б).

В поле СПО, в зоне ЗМусТ и ВМусТ, южнее ЮФСТ, наблюдаются отрица-

тельные значения МГС. В целом эта зона в данной работе названа СВ ССБЭФ. В сезонном цикле ось фронта смещается от крайнего северного положения (11° с.ш.) в апреле до 4° с.ш. в сентябре. Фронт наиболее обостряется в марте, когда усиливается ЗМусТ. В конце года с ослаблением ЗМусТ наблюдается ослабление СВ ССБЭФ (рис. 4, в).

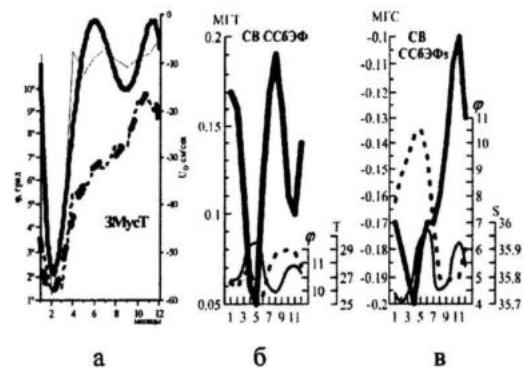


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для ЗМусТ (а) и СВ ССБЭФ в полях ТПО (б) и СПО (в)

Структура течений и фронтов в южных тропиках и умеренных широтах. К югу от экватора действует Южное экваториальное противотечение. В начале года стрежень течения располагается около 5° ю.ш., в середине года ЮЭПТ приближается ближе к экватору, в конце года снова смещается на $3 - 4^{\circ}$ ю.ш. (рис 5, а). В поле ТПО у экватора отмечается экстремум отрицательных значений МГТ, сезонные смещение которого повторяют смещения ЮЭПТ. Этот фронт назван **Фронтом Южного экваториального противотечения** (ФЮЭПТ). Максимум интенсивности ФЮЭПТ отмечается в период его смещения к северу – в июле (рис. 5, б).

В поле солености у экватора в первую половину года наблюдаются слабые положительные значения МГС, которые усиливаются в марте-апреле. Согласно широтному расположению этот максимум МГС был также назван **Фронтом Южного экваториального противотечения** (ФЮЭПТ). Начиная с июля, этот фронт смещается на юг, достигая южного положения (5° ю.ш.) в августе-сентябре, при этом заметно усиливаясь (рис. 5, в). В октябре ФЮЭПТ резко смещается к экватору и до декабря проявляется в виде минимума МГС на фоне их отрица-

тельных значений. Южнее экватора прослеживаются фронт с отрицательными значениями МГС, сезонные изменения положения которого повторяют смещения ФЮЭПТс.

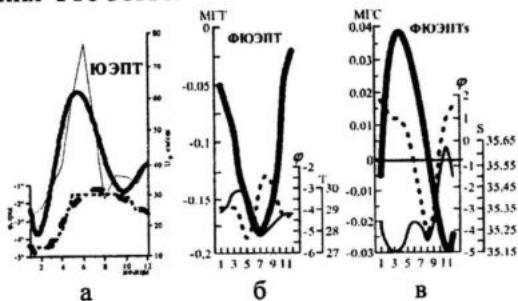


Рис. 5. То же, что на рис. 2, для ЮЭПТ (а) и ФЮЭПТ в полях ТПО (б) и СПО (в)

Между этими двумя фронтами располагаются соленые аравийские воды, которые пересекают экватор и в полосе 0 – 10° ю.ш. перемещаются в восточном направлении. Южная граница этих вод является ССбЭФс.

Между 7° и 22° ю.ш. прослеживается Южное пассатное течение. Основная ветвь располагается на 12 – 14° ю.ш. (рис. 6, а). Более слабая Южная ветвь ЮПТ наблюдается на 19 – 21° ю.ш. Несколько южнее широтного диапазона ЮПТ в поле ТПО наблюдается отрицательный экстремум МГТ, который представляет границу между наиболее теплыми экваториальными и южными тропическими водами – **Южный субэкваториальный фронт** (ЮСбЭФ). В первой половине – середине года фронт смещается на север, во второй – на юг и максимально обостряется в августе-сентябре (рис. 6, б).

В поле СПО южнее 15° ю.ш. наблюдаются положительные значения МГС, которые свидетельствуют об увеличении солености к центру халистатики южной части Индийского океана, который на 60° в.д. располагается между 30° и 35° ю.ш. ЮСбЭФс прослеживается между 18° и 27° ю.ш., при этом максимально смещается север в августе и обостряется в ноябре (рис. 6, в).

В январе-феврале между ФЮЭПТ и ЮСбЭФ около 10° ю.ш. наблюдаются положительные значения МГТ, которые связывают с проявлением **Южного тропического фронта** (ЮТФ) (рис. 1, б). Этот фронт является границей между

относительно холодными водами экваториальной дивергенции, которая наиболее выражена в начале года, и теплыми экваториальными водами.

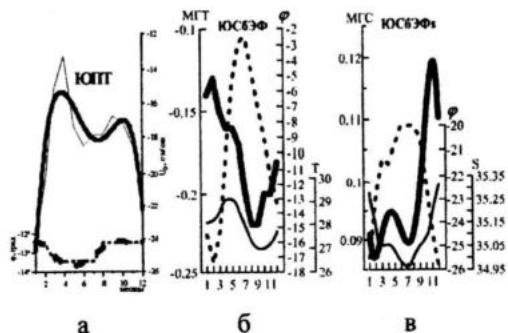


Рис. 6. То же, что на рис. 2, для ЮПТ (а) и ЮСбЭФ в полях ТПО (б) и СПО (в)

Между 20° и 30° ю.ш. прослеживается Южно-Индоокеанское течение, представляющее южную границу Южного субтропического антициклонического круговорота (ЮСАК) или **Южный субтропический фронт** (ЮСбТФ). Основная ветвь ЮИТ мигрирует между 25° и 29° ю.ш. и максимально усиливается в конце года (рис. 7, а). Ось ЮСАК характеризуется сменой знака зональной скорости, связанной с меридиональной границей между ветвями ЮПТ, направленными на запад, и ветвями ЮИТ восточного направления. На 60° в.д. эта граница располагается примерно на широте 21 – 22° ю.ш. В этих широтах наблюдаются минимальные значения МГТ.

Южный субтропический фронт располагается значительно южнее ЮИТ между 31° и 36° ю.ш. (рис. 7, б).

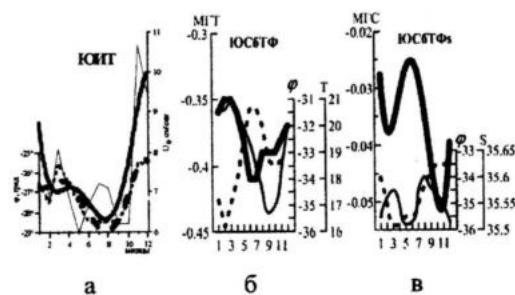


Рис. 7. То же, что на рис. 2, для ЮИТ (а) и ЮСбТФ в полях ТПО (б) и СПО (в)

В поле солености ось ЮСАК располагается на границе между положительными и отрицательными значениями МГС. Полоса положительных МГС при-

мерно совпадает с положением ЮИТ, тогда как отрицательные значения МГС смешены южнее 30° ю.ш., в зону слабых зональных течений, а ЮСБТФс располагается между 33° и 36° ю.ш. (рис. 7, в).

Таким образом, ось ЮСАК в поле солености располагается почти на $5 - 7^{\circ}$ южнее, чем в поле зональных геострофических скоростей. Эта особенность отличает Индийский океан от других океанов. Причиной этого отличия является особенности пространственного распределения осадков над акваторией Индийского океана. Зона повышенных осадков вытягивается в юго-западном направлении над всей акваторией южных тропиков от Зондского архипелага до о. Мадагаскар. Здесь наблюдается обширная область поверхностного распреснения, а южный субтропический максимум солености, который в других океанах располагается между 15° и 25° ю.ш., в Индийском океане смешен на юг на $25 - 35^{\circ}$ ю.ш. При этом соленость в нем существенно меньше (< 35.7 %).

Смещение субтропического максимума на юг приводит к соответствующему смещению системы поверхностных фронтов в поле СПО. Ветви ЮСБЭФс и ЮСБТФс в Индийском океане на 60° в.д. смешены, соответственно, на 25° и 35° ю.ш.

Заключение. Комплексный анализ структуры течений и фронтов показал, что в силу орографических особенностей, муссонного режима и обильных осадков в тропической зоне Индийского океана формируется система поверхностных фронтов, крайне асимметричная относительно экватора, которая принципиально отличается от крупномасштабной структуры фронтов в тропиках других океанов.

В распределении меридиональных градиентов температуры и солености выделяются закономерности, которые связаны с сезонными особенностями циркуляции вод. В северных тропиках структура фронтов формируется под влиянием адвекции холодных и распресненных вод в системе Сомалийского и Аравийского восточного течений в Аравийское море; и относительно теплых и высокосоленых в юго-западном направлении Западным муссонным течением, переносом Южным экваториальным

противотечением высокосоленых аравийских вод на восток.

Наличие области высокого распределения в южных тропиках приводит к смещению оси Южного субтропического антициклонического круговорота, что сопровождается соответствующим смещением всей системы поверхностных фронтов на юг в среднем на 5-7 градусов по сравнению с другими океанами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Luijeharms J.R.E.* Location of frontal systems between Africa and Antarctica: some preliminary results // Deep Sea Res. – 1985. – 32. – № 12. – P. 1499 – 1509.
2. *Belkin I.M., Gordon A.L.* Southern Ocean fronts from the Greenwich Meridian to Tasmania // J. Geophys. Res. – 1996. – 101. – № C2. – P. 3675 – 3696.
3. Канаев В.Ф., Нейман В.Г., Паррин Н.В. Индийский океан. Природа и ресурсы Мирового океана. – М.: Мысль, 1975. – 284 с.
4. *Stramma L.* The South Indian Ocean Current // J. Phys. Ocean. – 1992. – № 22. – P. 421 – 439.
5. *Deng X., Hwang C. et al.* Seasonal and interannual variations of the Leeuwin current off Western Australia from TOPEX/Poseidon satellite altimetry // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2008. – 19. – № 1 – 2. – P. 135 – 149.
6. *Schott F.A.* Indian Ocean circulation and climate variability // Reviews of Geophysics. – 2009. – 47. – P. 1 – 46.
7. http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html.
8. <http://podaac.jpl.nasa.gov/woce/woce3>.
9. <http://www.aviso.oceanobs.com/index.phpid=1526>.
10. Артамонов Ю.В., Скрипальева Е.А. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // ИЗК. – 2005. – № 4. – С. 62 – 75.
11. Федирко А.В. Структура и изменчивость геострофических течений Индоокеанского сектора Южного океана по контактным и спутниковым данным (наст. сб).
12. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.В., Ломакин П.Д. Циркуляция вод деятельного слоя Южной Атлантики // Препринт. – МГИ НАН Украины, Севастополь, 2001. – 86 С.