

УДК 551.465

**СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЕРЕНОСОВ  
ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ  
КОНТАКТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Ю.В. Артамонов, А.В. Федирко, А.А. Кубряков, Е.А. Скрипалёва, С.В. Станичный**

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

На основе климатического массива World Ocean Atlas-2009, массива альтиметрических данных аномалий уровня океана за 1993–2010 гг. исследована сезонная и межгодовая изменчивость переносов геострофических течений в Южном океане. Анализируется связь пространственно-временной изменчивости геострофических переносов с изменчивостью индексов атмосферной циркуляции Южного и Антарктического колебаний.

**Сезонна та міжрічна мінливість переносів геострофічних течій у Південному океані за даними контактних та супутникових вимірів.**

Ю.В. Артамонов, О.В. Федірко, А.А. Кубряков, О.О. Скрипальова, С.В. Станічний.

**Реферат.** На основі кліматичного масиву World Ocean Atlas-2009, масиву альтиметричних даних аномалій рівня океану за 1993–2010 рр. досліджено сезонну та міжрічну мінливість переносів геострофічних течій у Південному океані. Проаналізовано зв'язок просторово-часової мінливості геострофічних переносів з мінливістю індексів атмосферної циркуляції Південного та Антарктичного коливаль.

**Seasonal and interannual variability of geostrophic current's transport in the South Ocean by hydrological and satellite measurements.**

Ju.V. Artamonov, A.V. Fedirko, A.A. Kubryakov, E.A. Skripaleva, S.V. Stanichny.

**Abstract.** On the basis of climatic array World Ocean Atlas-2009 and sea level anomalies altimetry data for 1993–2010 the seasonal and interannual variability of geostrophic current's transport in the South Ocean is investigated. The connection of geostrophic transport's spatial-temporal variability with indexes of atmospheric circulation Southern Oscillation and Antarctic Oscillation is analyzed.

**Key words:** South Ocean, geostrophic current's transport, Antarctic Circumpolar current, seasonal and interannual variability, Southern Oscillation and Antarctic Oscillation indexes.

**1. Введение**

В последние десятилетия в связи с пополнением массивов гидрологических и спутниковых данных, развитием дрейферных технологий, совершенствованием методов усвоения натурных данных в океанических моделях особый акцент делается на исследовании изменчивости течений на разных пространственно-временных масштабах. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этом направлении, отмечается разный уровень их региональной изученности. В Южном океане наибольшее внимание уделялось Зоне схождения Бразильского и Фолклендского течений, проливу Дрейка, региону к югу от Африки, Тихоокеанскому и Индоокеанскому секторам [1–5, 7–9, 11, 13–15]. При этом выявленные закономерности изменчивости характеристик течений сезонного и межгодового масштабов остаются предметом обсуждения. Это связано с тем, что авторы используют разные объемы гидрологических и спутниковых измерений, разные методы усвоения данных альтиметрии. Исследование течений в Южном океане по контактными данным

затруднено также из-за неравномерной обеспеченности гидрологическими измерениями по пространству. Наименее обеспечено первичной информацией море Уэдделла и тихоокеанский сектор Южного океана. Наибольшее количество наблюдений собрано на материковых шельфах, в традиционных районах промысла, а также вдоль маршрутов судов в Антарктику (рис. 1, а) (Рис. 1, 3, 5-7 см. на цв. вклейке между 152 и 153 стр.). Наблюдается крайне неравномерное внутригодовое распределение данных. На рис. 1, б представлено распределение данных по месяцам для профиля к югу от Австралии, наиболее обеспеченного измерениями. Наибольшее количество наблюдений было выполнено в летние месяцы Южного полушария (в январе-феврале). Зимой наблюдения практически отсутствуют. Отмечается относительно большое количество измерений в течение всего года в южной части профиля на подходах к французской полярной станции Дюмон д'Юрвиль. К сожалению, такая хорошая обеспеченность наблюдениями нетипична для прибрежных районов Антарктиды.

Оценки сезонной изменчивости циркуляции вод усложняются тем, что в полярных широтах отмечается высокий уровень межгодовой изменчивости океанографических характеристик, в т.ч. и уровня океана [2]. Поэтому в работах, базировавшихся на относительно коротких рядах наблюдений (менее 10 лет), межгодовая изменчивость, особенно на масштабах Эль-Ниньо (3–7 лет), сглаживалась слабо, а климатический сезонный цикл воспроизводился не всегда корректно [5, 9, 11, 15]. В настоящее время накоплен почти 25-летний ряд аномалий уровня океана (АУО), рассчитанных по данным спутниковых измерений альтиметрами. С одной стороны, осреднение этих аномалий для каждого месяца за все годы позволяет существенно сгладить межгодовые вариации и получить среднемесячные климатические нормы значений АУО. Использование АУО совместно с архивными гидрологическими данными дает возможность существенно продвинуться в нашем понимании закономерностей сезонной изменчивости течений. С другой стороны, достаточно большая длина временного ряда альтиметрических данных позволяет оценить связь циркуляции вод с крупномасштабной изменчивостью в системе океан–атмосфера.

Целью настоящей работы является исследование сезонной и межгодовой изменчивости переносов геострофических течений в Южном океане на основе наиболее современных и полных массивов контактных и спутниковых измерений. По многолетним рядам индексов атмосферы (Южное и Антарктическое колебания) и геострофических переносов выполнены оценки связей между этими параметрами.

## 2. Материалы и методика

В работе использовались следующие массивы:

– климатический массив среднемесячных значений температуры и солёности в узлах регулярной одноградусной сетки на стандартных горизонтах от поверхности до 1500 м – World Ocean Atlas-2009 (WOA-09) [17];

– климатический массив среднемесячных значений АУО в узлах регулярной сетки с шагом  $1/3^\circ$  за период с 1993 по 2010 г. [18], полученный по измерениям современных альтиметров со спутников. При расчете полей АУО были учтены поправки, определяемые методами спутниковой альтиметрии [10, 12];

– массив модельных значений среднегодовой динамической топографии из работы [16];

– массивы среднемесячных значений индексов Южного (ЮК) и Антарктического (ААК) колебаний [19].

По среднегодовым и среднемесячным гидрологическим данным массива [17] для акватории Южного океана между  $30^\circ$  ю.ш. и берегом Антарктиды были рассчитаны динамические высоты относительно отсчетных поверхностей 500 и 1500 м. Среднемесячные значения АУО [18] были проинтерполированы в узлы одноградусной сетки и затем суммированы с динамическими высотами. Далее по стандартному геострофическому

соотношению вычислялись скорости течений. Расчеты проводились тремя способами: по разностям среднемесячных динамических высот, рассчитанных только по гидрологическим данным (метод 1); по разностям динамических высот, которые вычислялись как сумма среднегодовых значений динамических высот по гидрологическим данным и среднемесячных значений АУО (метод 2); по разностям динамических высот, которые вычислялись как сумма среднемесячных значений АУО и среднегодовой динамической топографии, полученной по модельным расчетам [16] (метод 3). Сравнение результатов расчета скоростей течений тремя способами показало качественно одинаковый результат (рис. 2, а). Наблюдается совпадение количества и положения основных максимумов. Можно отметить несколько более высокие скорости по методу 3. Это связано с тем, что динамическая топография, взятая из работы [16], является наиболее репрезентативным модельным продуктом, который усваивает все современные океанографические данные (контактные гидрологические, спутниковые данные, результаты измерений дрейфтерами и т.д.). Учитывая этот факт, межгодовая изменчивость динамики вод анализировалась в основном по результатам расчетов методом 3.

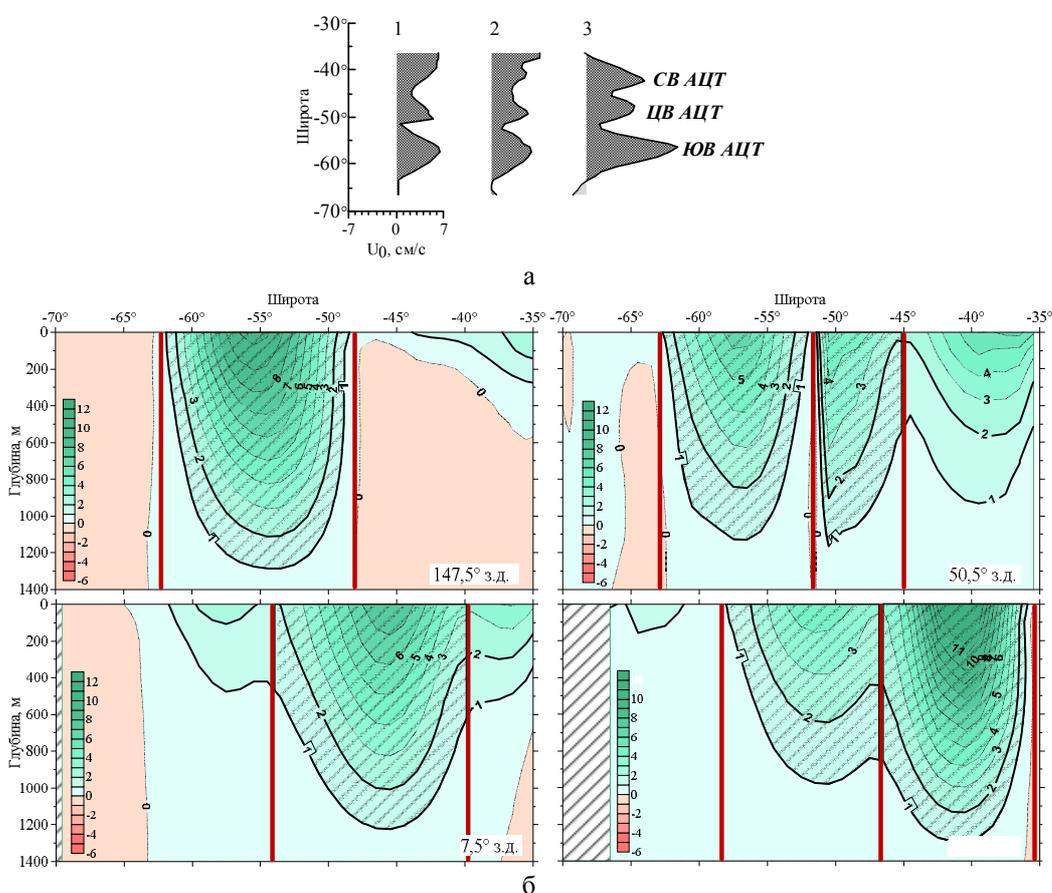


Рис. 2. Среднегодовая геострофическая скорость на поверхности  $U_0$ , рассчитанная по методам 1, 2 относительно 1500 м и по методу 3 (а); распределение среднегодовых зональных геострофических скоростей вдоль меридианов 147.5°, 50.5°, 7.5° з.д. и 46.5° в.д., рассчитанных по данным WOA-09 относительно нулевой поверхности 1500 м (б). Широтные диапазоны основных ветвей АЦТ отмечены штриховкой. СВ, ЦВ и ЮВ АЦТ – Северная, Центральная и Южная ветви АЦТ.

В Южном океане крупномасштабные течения носят преимущественно зональный характер, поэтому в работе анализировалось распределение зональной составляющей скорости течений  $U$ . Учитывая также, что течения в этом регионе проникают на большие глубины, для выделения широтных диапазонов, в пределах которых располагаются основные ветви Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), анализировались распределения среднегодовых зональных геострофических скоростей на меридиональных разрезах, рассчитанные относительно 1500 м (рис. 2, б).

В некоторых районах Южного океана можно выделить два основных климатических максимума скорости, соответствующих отдельным ветвям АЦТ, поэтому в этих районах расчетные области перекрывают друг друга (рис. 3). В связи с этим вся акватория Южного океана была условно разделена на четыре сектора, в каждом из которых наблюдался один максимум скорости АЦТ: Тихоокеанско-Атлантический (ТА) ( $180-30^\circ$  з.д.), Атлантико-Индоеокеанский (АИ) ( $60^\circ$  з.д. –  $60^\circ$  в.д.), Индоеокеанский (И) ( $30-100^\circ$  в.д.) и Индоеокеанско-Тихоокеанский (ИТ) ( $90-180^\circ$  в.д.).

Анализ меридиональных распределений  $U$  в климатическом сезонном цикле (рис. 4, а) и в отдельные годы (рис. 4, б) показал, что ветви АЦТ не всегда проявляются так же четко, как в случае среднегодовой картины (рис. 2, а). Это связано с тем, что в некоторые месяцы и годы отдельные струи АЦТ могут сливаться в единый поток или вообще исчезать, что приводит к неопределенности при их выделении. Чтобы минимизировать эти неопределенности и получить оценки сезонной и межгодовой изменчивости АЦТ, был использован интегральный подход. Для этого на каждом отдельном меридиане с дискретностью  $1^\circ$  по долготе были рассчитаны единичные одноградусные расходы относительно 500 и 1500 м, которые затем были просуммированы в широтных диапазонах, охватывающих зону АЦТ (рис. 3).

Переносы рассчитывались по скоростям, удовлетворяющим условию  $U > 1$  см/с при отсчётной поверхности 500 м и  $U > 2$  см/с при отсчётной поверхности 1500 м. При анализе сезонной и межгодовой изменчивости АЦТ рассматривалась только часть общего геострофического переноса в верхнем 50-метровом слое. Этот слой наиболее подвержен влиянию атмосферы и характеризуется наиболее однородной вертикальной структурой. Глубже 50 метров наблюдаются экстремумы температуры, связанные с Антарктической зимней водной массой в полярных широтах, и экстремумы солёности, связанные с подповерхностным максимумом солёности субтропического происхождения в умеренных широтах.

Учитывая, что в ряде районов изменчивость абсолютных значений переносов на сезонном и особенно на межгодовом масштабе невелика, в работе анализировались пространственно-временные распределения аномалий переносов. Сезонные аномалии рассчитывались как разность между величиной переноса для данного климатического месяца и среднегодовым его значением на данном меридиане. Межгодовые аномалии вычислялись как разность между величиной переноса для конкретного месяца каждого года и средним климатическим переносом за этот месяц.

Отметим, что основное внимание при анализе сезонной изменчивости аномалий переносов, рассчитанных по гидрологическим данным, уделялось результатам, полученным относительно отсчётной поверхности 500 м, так как сезонный цикл переносов относительно 1500 м более зашумлен. Это, вероятно, связано с низкой обеспеченностью гидрологическими данными по месяцам на больших глубинах.

Для количественных оценок связей изменчивости аномалий геострофических переносов и индексов атмосферной циркуляции ЮК и ААК на межгодовом масштабе между этими параметрами были рассчитаны кросскорреляционные функции с 95%-ным уровнем статистической достоверности.

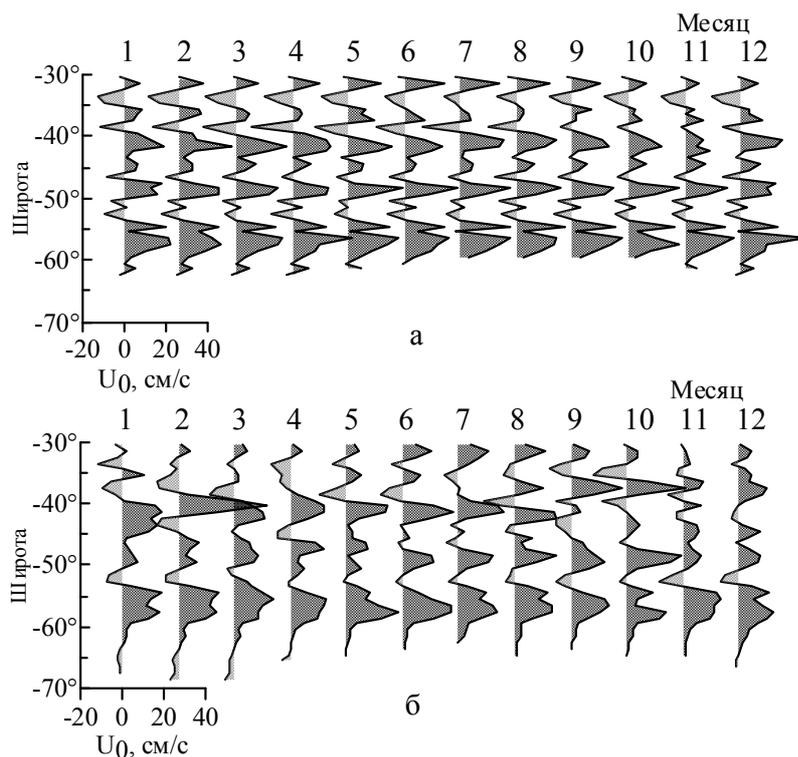


Рис. 4. Климатический сезонный цикл скорости  $U_0$  (а) и сезонный цикл  $U_0$  для 1993 г. (б) по методу 3 вдоль  $50^\circ$  з.д.

### 3. Анализ результатов

Климатические внутригодовые распределения аномалий переносов для четырех секторов Южного океана по гидрологическим и спутниковым данным в целом показывают общие закономерности. По результатам независимых расчетов проявляется сезонный сигнал АЦТ с положительными аномалиями переносов в первую половину года (лето-осень Южного полушария) и отрицательными во вторую (зима-весна Южного полушария). Наиболее четко он выражен при расчетах методом 3 (рис. 5). По гидрологическим данным (метод 1) можно выделить области, где появляется полугодовая периодичность, тогда как при расчетах с использованием данных альтиметрии (метод 3) полугодовой сигнал в этих областях не наблюдается. Такие различия связаны, вероятно, с недостатком контактных гидрологических данных, особенно в зимний период.

Наиболее устойчивая картина сезонного сигнала при расчетах с использованием альтиметрических данных АУО наблюдается в секторах ТА и АИ (рис. 5). Исключение составляют участки между  $130^\circ$  и  $150^\circ$  з.д., между  $55^\circ$  и  $70^\circ$  з.д. в секторе ТА и между  $30^\circ$  и  $50^\circ$  в.д. в секторе АИ, где в сезонном цикле явно прослеживается фазовый сдвиг. По мере продвижения на восток (сектора И и ИТ) сезонные вариации переносов в зоне АЦТ в целом ослабевают и сигнал более зашумлен.

Совместный анализ распределений среднегодовых скоростей и сезонной изменчивости аномалий переносов выявил тенденцию к качественному совпадению положения областей с их максимальной сезонной изменчивостью и областей ослабления среднегодовой геострофической скорости АЦТ (рис. 3, 5). В Тихоокеанско-Атлантическом секторе это

районы между  $160^\circ$  и  $180^\circ$  з.д. и между  $70^\circ$  и  $120^\circ$  з.д., в Атлантико-Индоеокеанском – район между  $0^\circ$  и  $20^\circ$  в.д., в Индоеокеанском – область к юго-востоку от Африки ( $20$ – $30^\circ$  в.д.).

Анализ изменчивости межгодовых аномалий переносов за период с 1993 по 2010 г. в целом выявил те же закономерности, что и в распределении сезонных аномалий. При относительной зашумленности межгодовых распределений хорошо прослеживается доминирование положительных аномалий переносов в апреле и отрицательных в октябре. Примеры таких распределений в Тихоокеанско-Атлантическом секторе для апреля и октября представлены на рис. 6, а. Ниже на рис. 6, б приведены внутригодовые распределения общего количества случаев с положительными и отрицательными сезонными (сплошная) и межгодовыми (пунктир) аномалиями переносов для четырех секторов Южного океана. Видно, что максимальное количество случаев с положительными как сезонными, так и межгодовыми аномалиями во всех секторах наблюдается в апреле и соответствует минимуму их отрицательных значений. Во времени наступления максимального количества случаев с отрицательными аномалиями и минимума с положительными аномалиями наблюдается фазовое запаздывание с запада на восток: август-сентябрь – в секторе ТА, сентябрь-октябрь – в секторе АИ, ноябрь – в секторах И и ИТ.

Анализ корреляционных связей между аномалиями переносов на каждом отдельном меридиане с индексами атмосферной циркуляции Южное колебание и Антарктическое колебание позволил выделить некоторые особенности их пространственного распределения. Наиболее тесные прямые корреляционные связи межгодовых аномалий переносов ( $R \sim 0.6$ – $0.8$ ) с индексом ЮК со сдвигом  $\tau$  до 2 лет наблюдаются в секторе ТА между  $140^\circ$  и  $180^\circ$  з.д. и между  $85^\circ$  и  $100^\circ$  з.д., где хорошо выражена сезонная изменчивость переносов (рис. 5, 7, а). Высокие положительные связи наблюдаются также в секторе АИ между  $50^\circ$  з.д. и  $20^\circ$  в.д. По мере удаления от основного источника формирования ЮК в Тихом океане в секторе АИ наблюдается тенденция к запаздыванию появления областей высоких корреляционных связей с ЮК в восточном направлении. Между  $50^\circ$  и  $30^\circ$  з.д. сдвиг составляет около 2–4 лет, между  $25^\circ$  и  $10^\circ$  з.д. – 6–7 лет, восточнее, между  $5^\circ$  з.д. и до  $20^\circ$  в.д., сдвиг возрастает до 8–9 лет.

Совместный анализ распределения максимумов корреляционных функций и среднегодовой геострофической скорости в зоне АЦТ (рис. 3, 7 а) показал, что в среднем реакция переносов на изменения индексов атмосферной циркуляции наиболее выражена в районах с повышенными значениями среднегодовых скоростей.

Корреляционные связи аномалий переносов с индексом ААК (рис. 7, б) в целом несколько ниже, чем с ЮК. Относительно большие участки со значимыми положительными связями ( $R \sim 0.4$ – $0.6$ ) на сдвиге 2–3 года обнаружены между  $80^\circ$  и  $110^\circ$  з.д. в секторе ТА и между  $80^\circ$  и  $160^\circ$  в.д. в секторах И и ИТ. Явной связи между распределением среднегодовой геострофической скорости, областями ее экстремальной сезонной изменчивости и структурой корреляционных связей между аномалиями переносов с индексом ААК не обнаруживается. Вероятно, это объясняется с тем, что индекс ААК является усредненной характеристикой состояния атмосферы над Антарктикой, и не учитывает особенности атмосферных процессов в отдельных ее регионах.

Отметим, что в регионе Антарктического полуострова ( $60$ – $80^\circ$  з.д.) к западу и востоку от  $70^\circ$  з.д. корреляционные связи межгодовых аномалий переносов с индексами ЮК и ААК имеют противоположный знак. Возможно, этот эффект связан с влиянием Антарктической дипольной моды, которая проявляется в виде аномалий противоположного знака в полях гидрометеопараметров к западу и востоку от полуострова [6].

#### 4. Заключение

Анализ сезонной и межгодовой изменчивости геострофических переносов показал, что усиление АЦТ происходит в конце лета и в начале осени Южного полушария. В

климатическом сезонном цикле наблюдается фазовое запаздывание во времени наступления максимального ослабления АЦТ с запада на восток: август-сентябрь – в секторе Тихоокеанско-Атлантическом, сентябрь-октябрь – в секторе Атлантико-Индоеокеанском, ноябрь – в секторах Индоеокеанском и Индоеокеанско-Тихоокеанском.

В общем случае в Южном океане максимальная сезонная изменчивость переносов наблюдается в районах ослабления среднегодовой геострофической скорости АЦТ. Сезонные вариации переносов в зоне АЦТ ослабевают в восточном направлении.

Реакция переносов на изменения индекса ЮК наиболее выражена в районах с повышенными значениями среднегодовых скоростей. Выявлена тенденция к запаздыванию появления зон высоких положительных корреляционных связей с ЮК в восточном направлении, которая наиболее четко проявляется в Атлантико-Индоеокеанском секторе.

К западу и востоку от Антарктического полуострова корреляционные связи межгодовых аномалий переносов с индексами ЮК и ААК имеют противоположный знак, что может быть следствием влияния Антарктической дипольной моды.

Корреляционные связи аномалий переносов с индексом ААК в целом ниже, чем с ЮК, при этом общих крупномасштабных закономерностей в распределениях среднегодовой геострофической скорости, областей ее экстремальной сезонной изменчивости и структурой корреляционных связей между аномалиями переносов с индексом ААК не обнаружено.

### Литература

1. **Артамонов Ю.В.** Циркуляция Южной Атлантики по результатам диагностического моделирования и натурным наблюдениям // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 6. – С. 23–3.
2. **Артамонов Ю.В.** Сезонная изменчивость геострофических течений Атлантического океана по альтиметрическим данным // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 3. – С. 60–71.
3. **Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д.** Циркуляция вод деятельного слоя Южной Атлантики. – Севастополь, 2001. – 86 с. – (Препринт / НАН Украины, МГИ).
4. **Зимин А.В.** Использование данных спутниковой альтиметрии для мониторинга динамических процессов в море Скотия и задач промыслового прогнозирования // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 3. – С. 66–72.
5. **Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А.** и др. Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // Океанология. – 2003. – 43. – № 5. – С. 671–682.
5. **Скрипалева Е.А.** Региональные особенности межгодовой изменчивости структуры поля температуры поверхности океана в районе Антарктического полуострова по данным реанализа NCEP // Доповіді НАН України. – 2012. – № 11. – С. 126–131.
6. **Cunningham S., Pavic M.** Surface geostrophic currents across the Antarctic circumpolar current in Drake Passage from 1992 to 2004 // Progr. Oceanogr. – 2007. – № 73. – P. 296–310.
7. **Deng X., Hwang C., Coleman R., Featherstone W.E.** 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.
8. **Diden N., Schott F.** Eddies in the North Brazil current retroflection region observed by GEOSAT altimetry // J. Geophys. Res. – 1993. – 98. – P. 20,121–20,131.
9. **Fu L.L., Cazenave A.** Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications. International Geophysics Series. – San Diego: Academic Press, 2001. – 69. – 457 p.
10. **Lebedev S.A., Sirota A.M.** Oceanographic investigation in the Southeastern Pacific Ocean by satellite radiometry and altimetry data // Advances in Space Res. – 2007. – 39. – P. 203–208.
11. **Le Traon P.Y., Nadal F., Ducet N.** An improved mapping method of multisatellite altimeter data // J. Atmos. Oceanic Technol. – 1998. – 15. – P. 522–533.

12. **Losch M., Schroter J.** Estimating the circulation from hydrography and satellite altimetry in the Southern Ocean: limitations imposed by the current geoid models // *Deep-Sea Res.* – 2004. – 1. – № 51. – P. 1131–1143.
13. **Park Y.-H.** Determination of the surface geostrophic velocity field from satellite altimetry // *J. Geophys. Res.* – 2004. – 109. – № C05006. – doi: 10.1029/2003JC002115.
14. **Park Y.-H., Gamberoni I.** Large-scale circulation and its variability in the South Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry // *J. Geophys. Res.* – 1995. – 100. – № C12. – P. 24,911–23,929.
15. **Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G.** New CNES – CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // *J. Geophys. Res.* – 2011. – 116. – C07018, doi: 10.1029/2010JC006505.
16. [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr\\_woa09.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html).
17. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-mean-climatology/index.html#c7276>.
18. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrel/indices.html>.