

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЗИМНЕЙ И АНТАРКТИЧЕСКОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВОДНЫХ МАСС К ЮГУ ОТ АФРИКИ

Ю.В. Артамонов, А.В. Федирко

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

На основе климатического массива World Ocean Atlas – 2009 и массива фактических данных World Ocean Data – 2009 исследована сезонная изменчивость Антарктической зимней и Антарктической промежуточной водных масс к югу от Африки. Анализируется связь изменчивости водных масс с положением и интенсивностью крупномасштабных струй Антарктического циркумполярного течения.

Введение. В литературе существует большое количество работ, посвященных результатам исследований структуры и изменчивости водных масс Южного океана. Основные закономерности крупномасштабной структуры водных масс в Мировом океане, в том числе и в Южном, изложены в обобщающих монографиях [1 – 3]. В конце 80-х – начале 90-х годов вышла серия работ, в которых представлены результаты исследования структуры и циркуляции вод, гидрологических фронтов и водных масс верхнего слоя Южной Атлантики [4 – 8]. Эти работы базируются, в основном, на фактических экспедиционных материалах. В более поздних работах [9 – 11] на основе анализа фактических гидрологических данных и климатического моделирования исследуются механизмы формирования и изменчивости водных масс Южного океана.

В настоящее время, в связи с повышенным интересом к глобальной климатической изменчивости, большое внимание уделяется исследованиям динамики промежуточных, глубинных и донных вод. Большие успехи достигнуты в исследовании этих водных масс в проливе Дрейка, морях Скоша, Уэдделла и в Тихоокеанском секторе Южного океана. Здесь уточнены их количественные ха-

рактеристики и пути распространения [12 – 13].

В работе [14] приводятся некоторые оценки межгодовой изменчивости характеристик Антарктической промежуточной водной массы (АПВ). Одним из важных результатов этого исследования является установление факта, что за последние 40 лет АПВ подверглась опреснению на 0.05 ‰, что связано с резким изменением климата к западу от Антарктического полуострова.

В целом, анализ публикаций показал, что основное внимание уделяется изучению либо синоптической структуры, либо межгодовой изменчивости водных масс по данным конкретных экспедиций. Работы по климатическим массивам и архивным данным крайне ограничены. Можно назвать цикл работ [15 – 17], в которых показано, что формирование поверхностных водных масс находится в тесной связи с сезонной изменчивостью метеорологических процессов в Южном полушарии. Максимальные объемы холодных вод отмечаются в зимне-весенний период, теплых – летом-осенью, что еще раз подтверждает концепцию о доминирующем локальном механизме формирования поверхностных вод. Показано, что максимальная сезонная изменчивость объемов водных масс наблюдается в окрестностях крупномасштабных фронтов – Антарктического полярного (АПФ), Субантарктического (САФ) и Границы континентальных вод (ГКВ). В пределах АПВ отмечаются верхний и нижний максимумы изменчивости объемов вод, природа которых связана с изменчивостью АПФ и САФ.

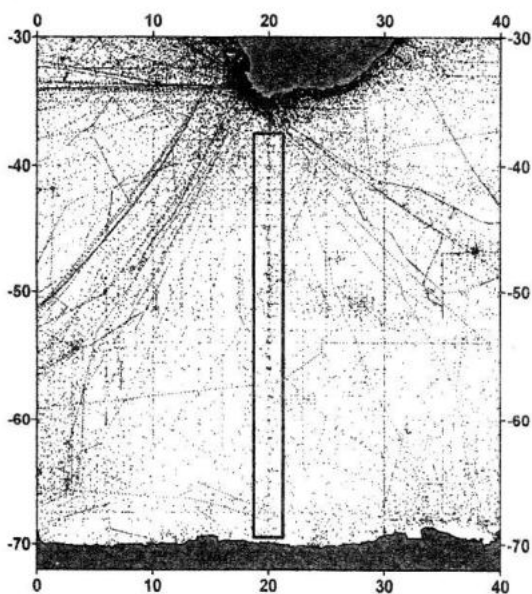
Работы [15 – 17] базируются на относительно устаревших массивах середины 90-х годов прошлого столетия. В настоящее время, в результате проведения серии международных океанографических проектов (WOCE, SAVE, МПГ 2007 – 2008 гг. и др.), существенно пополнена база архивных гидрологических данных, что позволяет выйти на новый качественный уровень в исследовании изменчивости водных масс.

Цель предлагаемой работы – на основе современных климатических и архивных баз данных исследовать внутри-

годовую изменчивость Антарктической зимней (АЗВ) и Антарктической промежуточной (АПРВ) водных масс.

Материалы и методика. Для анализа сезонной изменчивости характеристик водных масс использованы два массива: массив среднемесячных значений температуры и солёности, приведенных с помощью процедур объективного анализа в узлы регулярной одноградусной сетки и на стандартные горизонты от поверхности до 1500 м (*WOA – 2009*) [18]; и массив фактических данных архивной базы (*WOD – 2009*) [19].

В работе рассматривался район к югу от Африки, между 18 – 22° в.д., 37° ю.ш. и берегом Антарктиды, который наиболее обеспечен данными гидрологических измерений на меридиональных разрезах (рис. 1).

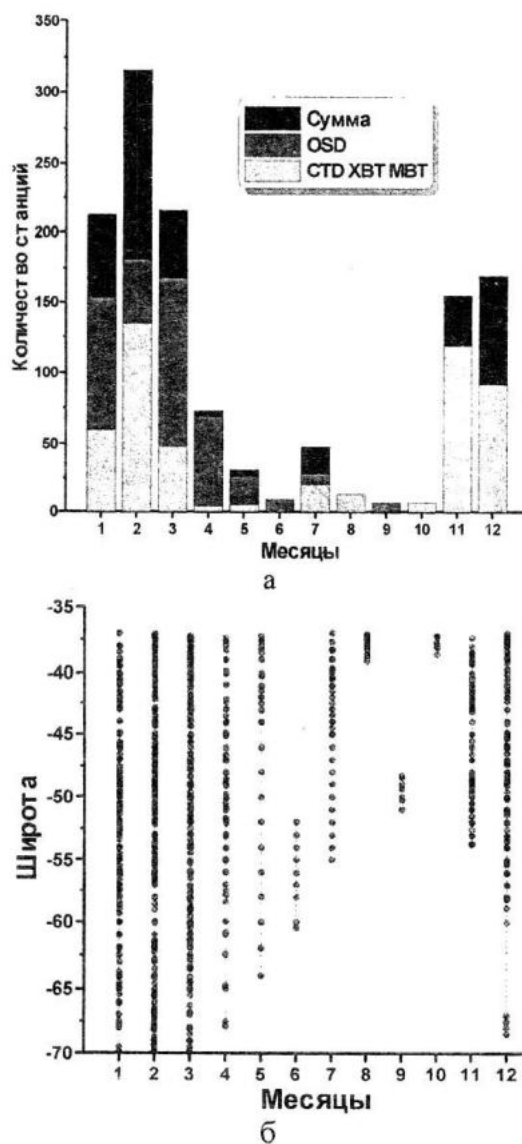


Р и с. 1. Распределение океанографических станций к югу от Африки. Прямоугольником выделена исследуемая область

Анализ количества измерений массива *WOD – 2009* в пределах выбранной меридиональной полосы показал, что наблюдается крайне неравномерная обеспеченность данными, как по пространству, так и по времени. Максимальная суммарная обеспеченность наблюдениями для всех типов измерений отмечается в феврале, минимальная – в сентябре-октябре (рис. 2, а). В холодное полугодие Южного полушария под влиянием ледовых условий южная гра-

ница измерений смещается на север почти до 50° ю.ш. (рис. 2, б).

Таким образом, по фактическим данным наиболее репрезентативно можно анализировать только часть сезонного цикла структуры вод для теплого полугодия Южного полушария. В данной работе использовались данные с декабря по май. В эти месяцы наблюдалось относительно равномерное распределение наблюдений по широте, а южная граница измерений достигала 65° ю.ш.



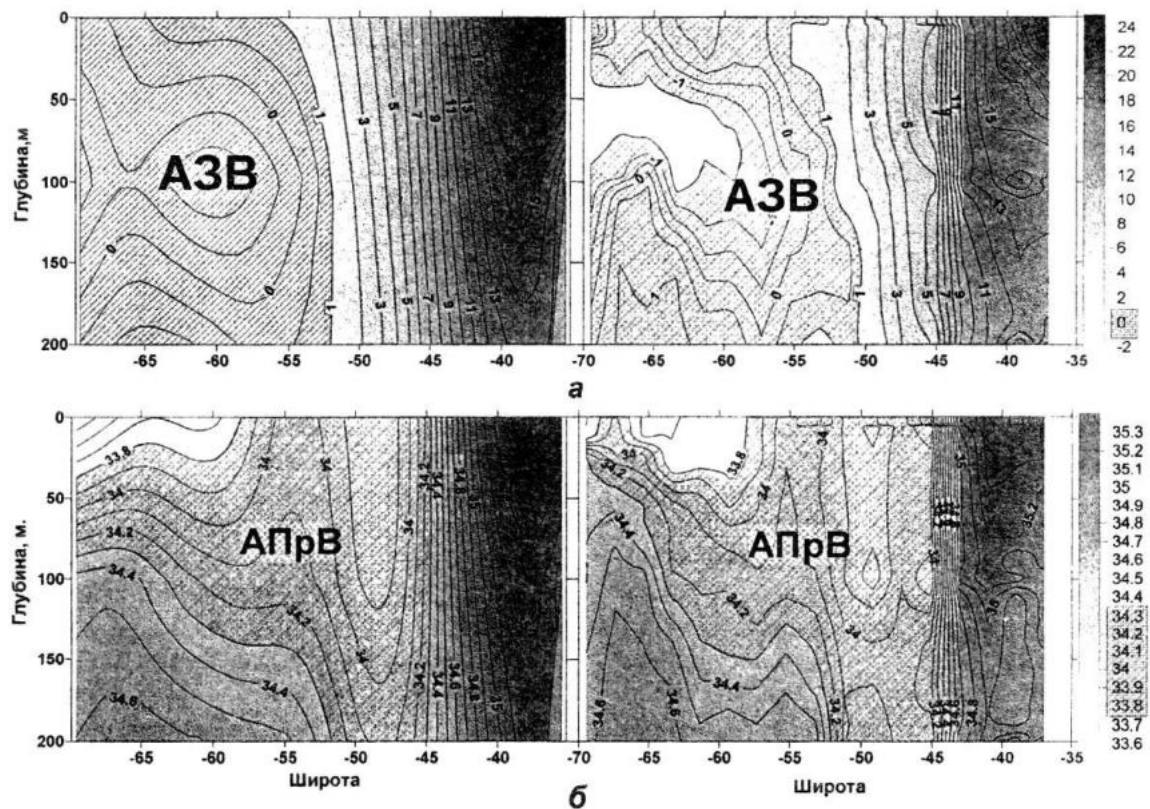
Р и с. 2. Обеспеченность данными измерений в меридиональной полосе между 18 – 22° в.д., 37° ю.ш. и берегом Антарктиды: а – количество гидрологических станций по месяцам, выполненных разными видами измерений; б – широтное расположение станций по месяцам

В работе рассматривается поверхностный слой океана до 200 м, который наиболее подвержен сезонной изменчивости и хорошо обеспечен измерениями. Значения температуры и солёности с помощью стандартного метода объективной интерполяции (Inverse Distance to a Power) были осреднены в рассматриваемой меридиональной полосе и приведены к одному разрезу вдоль 20° в.д. Далее измерения на фактических горизонтах были линейно интерполированы на горизонты с дискретностью по вертикали 1 м.

Для каждого из выбранных месяцев на разрезе были рассчитаны площади, занимаемые Антарктической зимней и Антарктической промежуточной водными массами. АЗВ выделялась как область с минимальной температурой в

верхнем 200-метровом слое. Характерным признаком АПрВ являлась минимальная солёность (рис. 3).

Чтобы минимизировать ошибки, связанные с определением границ водных масс по фиксированной изотерме или изохалине, которые изменяются в пространстве и времени, расчеты проводились для диапазонов температуры и солёности в пределах, в которых наиболее вероятно расположение границы соответствующей водной массы. Для АЗВ брался диапазон $-1.5 - 1$ °С с дискретностью расчетов 0.5 °С; для АПрВ – 33.8 – 34.3 ‰ с дискретностью 0.1 ‰. На рисунке 3 эти диапазоны заштрихованы. В качестве условной элементарной площади принимался прямоугольник со сторонами 1.1×10^6 м по горизонтали и 1 м по вертикали.



Р и с. 3. Разрезы по температуре (а) и солёности (б) для января, построенные по климатическому массиву *WOA – 2009* (слева) и по фактическим данным массива *WOD – 2009* (справа)

Независимые оценки сезонной изменчивости площадей АЗВ и АПрВ были выполнены по той же методике по данным климатического массива *WOA – 2009*. В отличие от базы фактических данных, этот массив в результате пространственно-временной интерполяции

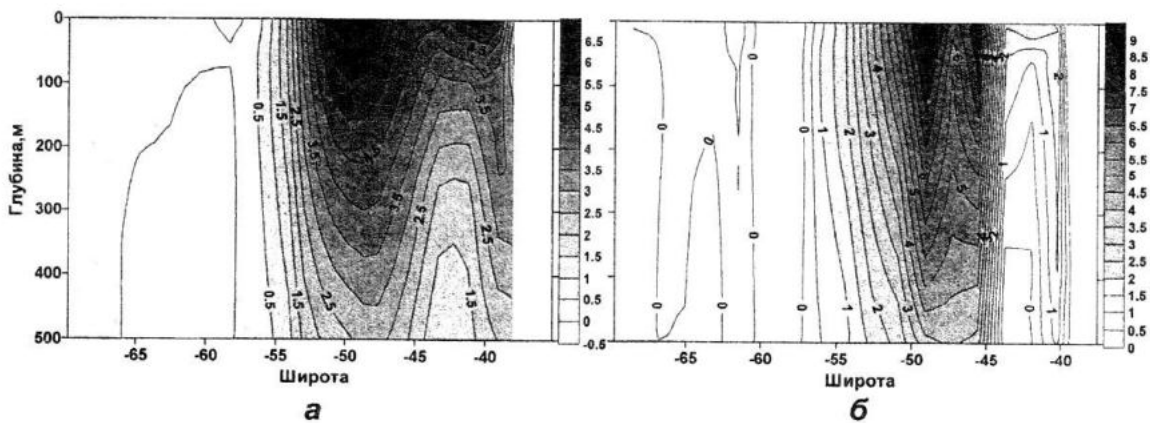
первичных данных имеет значения температуры и солёности на стандартных горизонтах в регулярной одноградусной сетке и для зимних месяцев. Понятно, что к этим значениям надо относиться осторожно. Полученные распределения необходимо рассматривать не как ло-

кальные особенности на данном меридиане, а как проявление более крупномасштабных черт термохалинной структуры вод. Вместе с тем, получение одинаковых закономерностей в изменчивости структуры вод по климатическим и фактическим данным повышает их достоверность.

По данным массивов *WOA – 2009* и *WOD – 2009* были рассчитаны геострофические скорости относительно отсчетной поверхности 1000 м (рис. 4). По

максимумам скорости были выделены основные крупномасштабные струи Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и проанализирован их внутригодовой ход.

В качестве независимых оценок положения и интенсивности струй АЦТ был использован массив аномалий уровня океана по данным альтиметрии с декабря 1992 по декабрь 2010 гг. со среднемесячным осреднением в узлах регулярной сетки 0.3° [20].



Р и с. 4. Геострофические скорости (см/с) на разрезе относительно отсчетной поверхности 1000 м для января: (а) – по климатическому массиву *WOA – 2009*, (б) – по фактическим данным массива *WOD – 2009*

Анализ результатов. В сезонной изменчивости площадей АЗВ выявлены следующие закономерности. По климатическому массиву [18] наибольшие площади АЗВ наблюдаются в зимне-весенний период Южного полушария (рис. 5). Их максимум отмечается в сентябре-октябре, после окончания процесса выхолаживания поверхностных вод. В это время внешний тепловой баланс океана переходит от отрицательного к положительному. Минимальное количество АЗВ отмечается в конце лета и осенью Южного полушария (февраль-март). В эти месяцы, наоборот, внешний тепловой баланс океана переходит от положительных значений к отрицательным [21]. Отметим что внутригодовой ход площадей АЗВ, рассчитанный для теплого полугодия по фактическим данным [19], после сглаживания полиномом пятой степени качественно согласуется с результатом по климатическим данным (рис. 5).

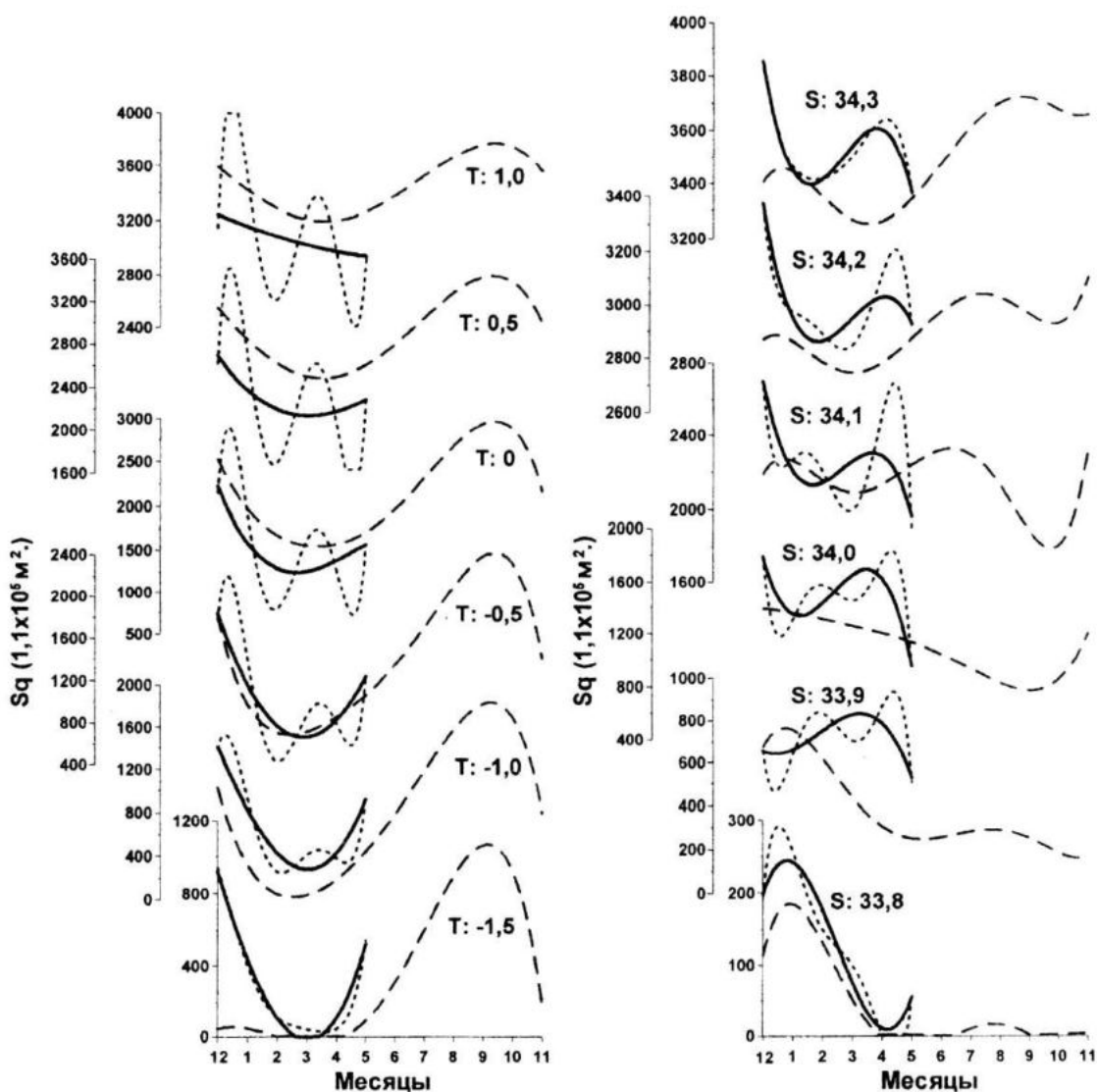
Во внутригодовой изменчивости АПрВ при диапазоне солёности 33.8 –

34.0 ‰, наибольшие площади наблюдаются в теплый период, когда океан получает тепло из атмосферы и происходит распреснение поверхностных вод за счет обильных осадков и таяния льдов. Максимальные площади АПрВ в верхних слоях отмечаются в феврале-марте, в конце периода интенсивного распреснения. В нижних слоях для диапазона изохалин 34.1 – 34.3 ‰ при увеличении солёности отмечается запаздывание наступления основного максимума площадей АПрВ почти на полгода. При значениях солёности 34.3 ‰ наибольшая площадь, занимаемая АПрВ, наблюдается в сентябре-октябре. Это может свидетельствовать о запаздывании сезонного сигнала с глубиной. При этом в начале года (декабрь-январь) формируется второй максимум. В связи с тем, что в изменчивости атмосферных процессов преобладает годовой сигнал, одной из вероятных причин появления второго максимума может быть динамика вод. Необходимо отметить, что наши результаты подтверждают выводы работы [17] о суще-

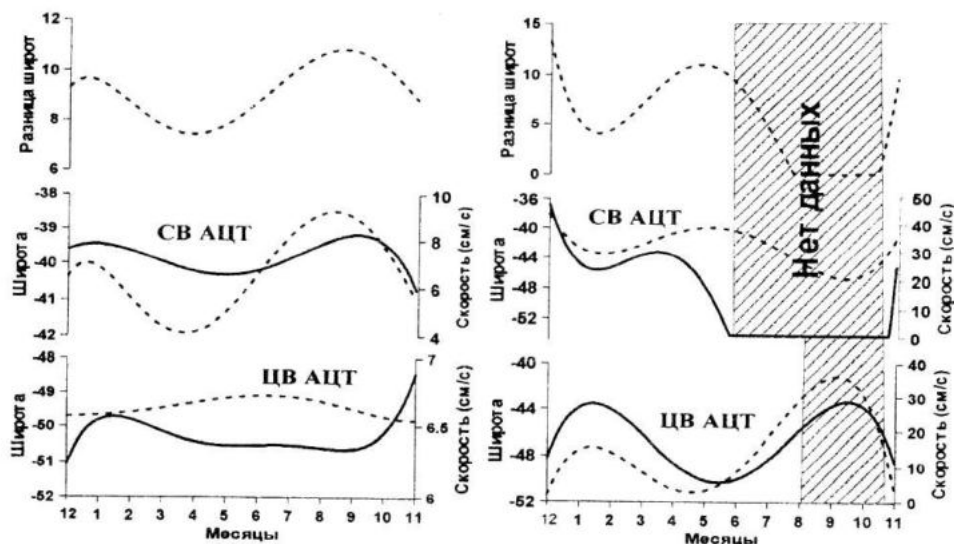
ствовании в пределах АПрВ верхнего и нижнего максимумов изменчивости объемов вод, природа которых связана с изменчивостью АПФ и САФ.

Полученные в данном исследовании закономерности сезонного цикла площадей АЗВ и АПрВ в целом находят свое объяснение во внутригодовой изменчивости ветвей АЦТ. В сезонной изменчивости ветвей Антарктического циркумполярного течения и характеристик соответствующих им Субантарктического и Антарктического полярного фронтов на фоне основного годового сигнала проявляется и полугодовая периодичность (рис. 6). По данным *WOA - 2009* удалось выделить две ветви АЦТ: Се-

верную (СВ) и Центральную (ЦВ), соответствующие Субантарктическому и Антарктическому полярному фронтам. Анализ разницы широтного положения ветвей АЦТ и соответствующих им фронтов показал, что она максимальна два раза в год: в январе и в сентябре. Аналогичная закономерность наблюдается в изменчивости площадей для глубинной части АПрВ. Вероятным объяснением этой закономерности может быть тот факт, что формирование АПрВ происходит между Субантарктическим и Антарктическим полярными фронтами. При расхождении фронтов увеличивается межфронтальное пространство, что способствует формированию большего объема АПрВ.



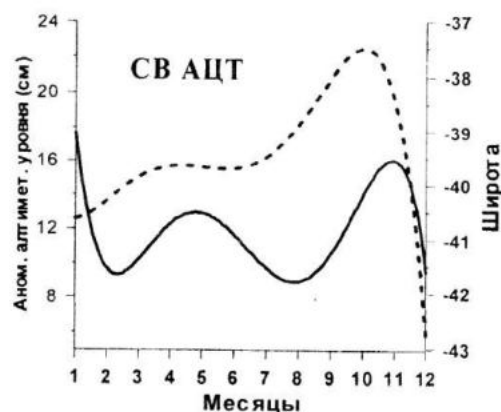
Р и с. 5. Сезонная изменчивость интегральных площадей АЗВ и АПрВ для различных диапазонов температуры T и солёности S по климатическому массиву [18] (пунктирные линии), по фактическим данным [19] (штриховые линии), по фактическим данным, сглаженным полиномом третьей степени (сплошные линии)



Р и с. 6. Внутригодовой ход максимумов геострофической скорости СВ и ЦВ АЦТ (сплошные линии) и их широтное положение (пунктир) по данным *WOA – 2009* (слева), по данным *WOD – 2009* (справа) (сглаживание полиномом третьей степени)

Отметим, что сезонная изменчивость положения Центральной ветви АЦТ (или Антарктического полярного фронта) является одной из причин изменчивости площади АЗВ. По климатическим и фактическим данным отмечается тенденция к смещению Центральной ветви АЦТ на север в холодное время года. По фактическим данным ЦВ АЦТ смещается на север два раза в год: более слабо в январе и более заметно в августе-сентябре. Примерно через месяц после второго смещения ЦВ АЦТ на север наблюдаются максимальные площади АЗВ. Такая закономерность вполне объяснима, так как ЦВ АЦТ или АПФ являются северной границей распространения АЗВ.

По данным альтиметрии на 20° в.д. удалось наиболее надежно выделить только СВ АЦТ и описать её внутригодовой цикл. Данные о наклоне уровня океана показали, что СВ АЦТ максимально отклоняется на север в сентябре-октябре (рис. 7). Это может быть косвенным признаком того, что вся система крупномасштабных струй АЦТ в этот период смещается на север, что подтверждает результаты расчетов характеристик АЦТ динамическим методом (рис. 6). Заметное смещение СВ АЦТ на север в сентябре-октябре по данным альтиметрии также служит косвенным подтверждением увеличения площади глубинной части АПрВ осенью Южного полушария по гидрологическим данным.



Р и с. 7. Внутригодовой ход максимума наклона уровня океана в СВ АЦТ (сплошная линия) и его широтного положения (пунктир) после сглаживания полиномом третьей степени по данным [20]

Заключение. Результаты расчетов сезонной изменчивости площадей водных масс на разрезе вдоль 20° в.д. с использованием двух баз данных (*WOD* и *WOA*) показали, что наибольшие площади АЗВ отмечаются в сентябре-октябре, после окончания выхолаживания поверхностных вод, АПрВ – в феврале-марте, в период, когда происходит распреснение поверхностных вод за счет обильных осадков и таяния льдов.

Совместный анализ сезонной изменчивости площадей водных масс и геострофических течений, а так же наклона уровня по данным альтиметрии, показал: в сентябре-октябре система крупномасштабных струй АЦТ и соответствующих

им Субтропического и Антарктического полярного фронтов смещается на север, что способствует увеличению объёма АЗВ. Получено, что в сентябре-октябре отмечается наибольшее широтное расхождение в положении АПФ и САФ. В это время на разрезе наблюдаются максимальные площади АПрВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов В.Н. Мировой океан. – М.: Знание, 1974. – 256 с.
2. Кукса В.И. Промежуточные воды Мирового океана. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 272 с.
3. Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 288 с.
4. Peterson R.G., Whitworth T.III. The Subantarctic and Polar Fronts in Relation to Deep Water Masses through the Southwestern Atlantic // *J. Geophys. Res.* – 1989. – 94. – № С8. – P. 10.817 – 10.839.
5. Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // *Prog. Oceanogr.* – 1991. – 26. – P. 1 – 73.
6. Кляусов Ф.В. О фронтальной зоне вблизи северной границы распространения морских льдов в Южном океане // *Океанология.* – 1993. – 33. – № 6. – С. 824 – 832.
7. Белкин И.М. Фронтальная структура Южной Атлантики // *Пелагические экосистемы Южного океана.* – М.: Наука, 1993. – С. 40 – 53.
8. Tsuchiya N., Talley L.D., McCartney M.S. Water-mass distribution in the western South Atlantic; A section from South Georgia Island (54° S) northward across the equator // *J. Marine Res.* – 1994. – 52. – № 1. – P. 55 – 81.
9. Stramma L., England M.H. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.* – 1999. – 104. – P. 20863 – 29883.
10. England M.H., Santoso A. Antarctic Intermediate Water variability in a coupled climate model // *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 2003.*
11. Santoso A., England M.H., Hirst A.C. Circumpolar Deep Water circulation and variability in a coupled climate model // *Journal of Physical Oceanography.* – 2006. – 36. – P. 1523 – 1552.
12. Тараканов Р.Ю. Циркумпольная донная вода в море Скоттия и проливе Дрейка // *Океанология.* – 2010. – 50. – № 1. – С. 5 – 22.
13. Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю. Промежуточные воды южной части Тихого океана // *Океанология.* – 2005. – 45. – № 4. – С. 485 – 503.
14. Naveira Garabato A.C., Jullion L., Stevens D.P., Heywood K.J., King B.A. Variability of Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water in the Drake Passage during the late-twentieth and early-twenty-first centuries // *J. of Climate.* – 2009. – 22(7). – P. 3661 – 3688.
15. Булгаков Н.П., Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д., Белокопытов В.Н., Скрипалева Е.А. Циркуляция, температура, соленость, ледовые условия юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Антарктики. Атлас. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2003. – 91 с.
16. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Вертикальная термохалинная структура, водные массы и крупномасштабные фронты Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики // *МГЖ.* – 2004. – № 3. – С. 39 – 52.
17. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Сезонная изменчивость термохалинных характеристик и объемно-статистических параметров водных масс в проливе Дрейка // *МГЖ.* – 2004. – № 6. – С. 62 – 73.
18. http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html.
19. <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/dbsearch.html>.
20. <http://www.aviso.oceanobs.com/index.php?id=1526>.
21. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А., Тимофеев Н.А., Юровский А.В. Распределение и сезонная изменчивость внешнего теплового баланса и его составляющих на поверхности Атлантического океана. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2004. – 50 с.