

ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОСНОВНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ

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

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

На основе среднемесячных гидрологических данных океанического реанализа ECMWF ORA-S3 исследованы пространственные особенности глубины проникновения сезонных колебаний температуры, солёности и скорости течений в Южном океане. Анализируются пространственные особенности сезонной изменчивости главных признаков Антарктической зимней, Антарктической промежуточной и Субтропической модовой водных масс (значений подповерхностных минимумов температуры, солёности, максимума солёности и глубин их залегания).

Введение. Несмотря на огромное количество работ, посвященных исследованию структуры вод Южного океана, представления об ее временной изменчивости относятся в основном к поверхностному слою, для которого за последние десятилетия накоплен огромный массив спутниковой информации. Сведения об изменчивости структуры вод в глубинных слоях крайне ограничены. Они относятся к отдельным районам океана, где выполнено достаточно большое количество гидрологических станций, которое позволяет сделать относительно достоверные выводы об особенностях изменчивости гидрологических параметров в подповерхностных слоях. К таким районам относятся пролив Дрейка [1 – 3], Юго-Западная Атлантика [4, 5], области к югу от Африки [6, 7] и Австралии [8].

В последние десятилетия наряду с пополнением базы экспериментальных данных интенсивно совершенствовались методы комплексного усвоения данных контактных и спутниковых измерений, а также инструментальных измерений течений. Это послужило толчком для соз-

дания нового поколения климатических массивов данных, имеющих более высокую пространственно-временную обеспеченность. К таким массивам относятся различные версии океанических реанализов, в частности, реанализы *ECMWF ORA-S1, S2* и *S3*. Их использование позволяет проводить анализ крупномасштабной структуры вод и ее изменчивости с большей статистической достоверностью по сравнению с традиционными гидрологическими массивами, такими, как климатический массив *World Ocean Atlas-2009 (WOA-09)*.

В настоящей работе на основе данных климатического массива реанализа *ECMWF ORA-S3* анализируются пространственные распределения глубины проникновения сезонных колебаний температуры, солёности и скорости течений в Южном океане и особенности сезонной изменчивости главных признаков Антарктической зимней, Антарктической промежуточной и Субтропической модовой водных масс.

Материалы и методика. В работе использовались среднемесячные значения температуры (T), солёности (S) и зональной составляющей скорости течений (U) из массива океанического реанализа *ECMWF ORA-S3* за период с 1959 по 2011 гг. в узлах одноградусной сетки [9]. Значения U в этом массиве получены на основе общей модели циркуляции океана *HOPE* [10]. Кроме того, по термохалинным параметрам массива *ORA-S3* были рассчитаны зональные геострофические скорости течений (U_g) относительно отчетной поверхности 1500 м.

Для анализа сезонной изменчивости вышеуказанные параметры были осреднены помесечно за весь 53-летний период. Для выявления районов с максимальной внутригодовой изменчивостью и оценки вклада годовой периодичности в общую сезонную изменчивость по этим осредненным данным рассчитывались среднеквадратические отклонения (СКО) и амплитуды годовой гармоники ($A_{\text{год}}$) на меридиональных разрезах от поверхности до 1500 м с дискретностью 1° вдоль круга широты. За глубину проникновения сезонных вариаций ($H_{\text{сез}}$) T , S , U_g , U условно принималась глубина,

на которой значения СКО и $A_{\text{год}}$ этих параметров уменьшались на порядок.

Для оценки связи пространственного распределения глубины проникновения сезонных вариаций с положением крупномасштабных фронтов и струйных течений на каждом стандартном горизонте рассчитывались горизонтальные меридиональные градиенты температуры (МГТ), солености (МГС) и зональной составляющей скорости течений (МГУ_z, МГУ) соответственно в °С/110 км, ‰/110 км и см/с/110 км. Отрицательные (положительные) значения градиентов показывают понижение (повышение) величины параметра в направлении с севера на юг.

Сезонная изменчивость гидрологических параметров проявляется в характеристиках водных масс и в положении их границ (фронтов и течений). Согласно существующим представлениям, Антарктический полярный фронт (АПФ) в подповерхностном слое является границей между Антарктической зимней (АЗВ) и Антарктической промежуточной (АПрВ) водными массами. В зоне Субантарктического фронта (САФ) взаимодействуют АПрВ и Субантарктическая модовая (СбАМВ) и Южно-Атлантическая центральная (ЮАЦВ) водные массы. Южный субтропический фронт (ЮСБТФ) разделяет СбАМВ и ЮАЦВ и Субтропическую модовую водную массу (СбТМВ) [4]. Субтропическая модовая водная масса отделяется от более теплой и высокосолёной Субтропической водной массы (СбТВ) центральных частей Южных субтропических антициклонических круговоротов (ЮСАК) еще одной ветвью ЮСБТФ. В Западной Атлантике ее называют Фронтон Бразильского течения (ФБТ) [4].

В верхнем слое вод, подверженном сезонным изменениям, из вышеперечисленных водных масс наиболее четко выраженные T, S -признаки имеют АЗВ, АПрВ и СбТМВ, которые характеризуются, соответственно, подповерхностными минимумами температуры ($T_{\text{мин}}$) для АЗВ, солености ($S_{\text{мин}}$) для АПрВ и максимумом солености ($S_{\text{макс}}$) для СбТМВ. Для исследования внутригодовой изменчивости этих главных признаков водных масс в работе были расчленены

СКО, $A_{\text{год}}$ и меридиональные градиенты $T_{\text{мин}}$, $S_{\text{мин}}$ и $S_{\text{макс}}$, а также глубин их залегания $HT_{\text{мин}}$, $HS_{\text{мин}}$ и $HS_{\text{макс}}$.

Анализ результатов. На рис. 1 в качестве примера приведены распределения МГТ, МГС, МГУ_z, МГУ на глубинах 100, 200 и 300 м и вертикальные распределения значений T , S , U_z , U в феврале, их внутригодовых СКО и амплитуд годовых гармоник на разрезе вдоль 30° з.д. Кроме того, для этого разреза представлены распределения МГТ на глубине $HT_{\text{мин}}$, МГС – на глубинах $HS_{\text{мин}}$ и $HS_{\text{макс}}$.

Анализ распределений СКО и $A_{\text{год}}$ показал, что они качественно одинаково отражают пространственные особенности интенсивности годового сигнала и глубины проникновения сезонных колебаний, что свидетельствует о доминирующем вкладе годовой гармоники в общую внутригодовую изменчивость.

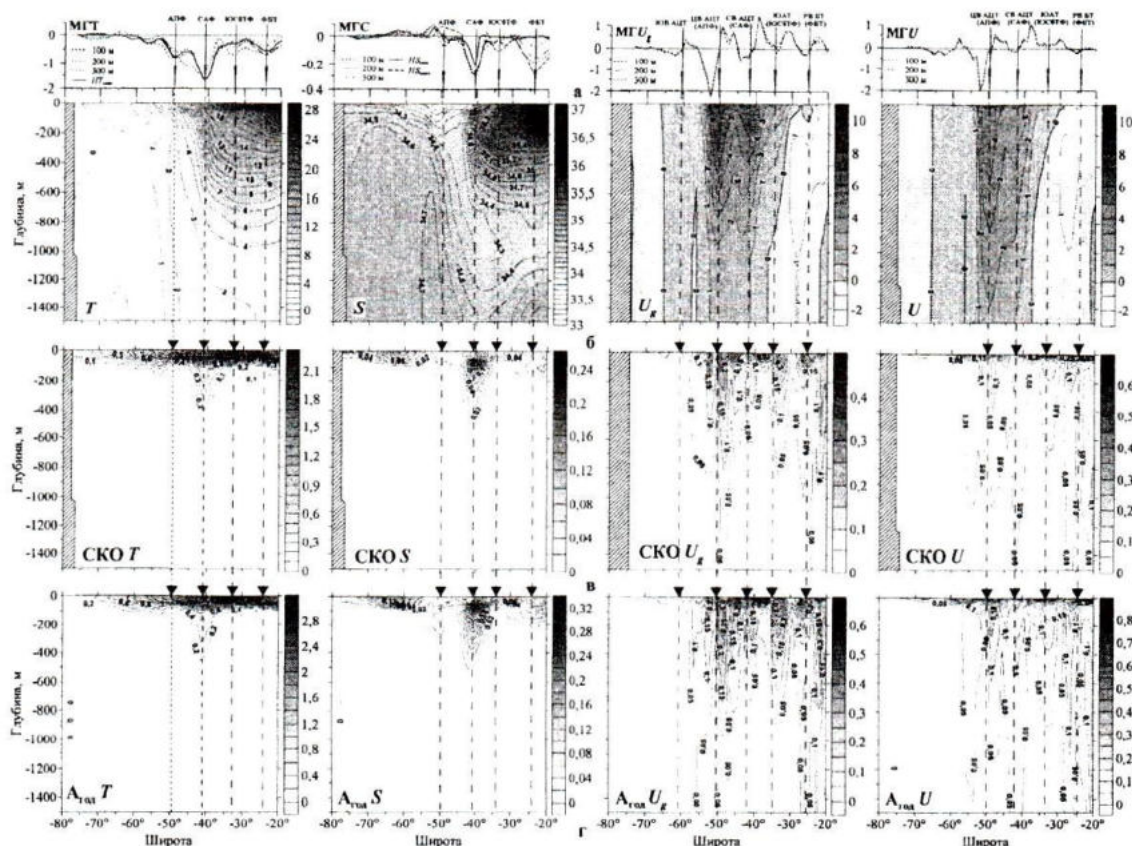
В поле температуры основной максимум глубины проникновения сезонных колебаний (~ 450 м) наблюдается в районе 40 – 43° ю.ш. Здесь прослеживаются высокие значения МГТ, соответствующие Субантарктическому фронту. К северу и югу от САФ сезонный сигнал не проникает глубже 150 м. На этом фоне около 53° ю.ш. отмечается увеличение $H_{\text{сез}}$ до 200 м, что связано с возрастанием сезонных колебаний характеристика АЗВ (СКО и $A_{\text{год}}$, $T_{\text{мин}}$) южнее АПФ (рис. 2, а, б).

В поле солености основной максимум глубины проникновения сезонного сигнала (~ 450 м) располагается также в зоне САФ около 43° ю.ш. Большая глубина проникновения сезонных колебаний в полях T и S непосредственно в зоне САФ связана с большой глубиной проникновения границы взаимодействия вод разного типа, и, как следствие, высоких значений МГТ и МГС. Незначительные сезонные меридиональные смещения фронта обуславливают высокие значения СКО и $A_{\text{год}}$ T - S -параметров.

Некоторое увеличение $H_{\text{сез}}$ наблюдается севернее ЮСБТФ, что связано с ростом сезонных колебаний подповерхностного максимума солености СбТМВ (рис. 2, а, б). Большие значения $H_{\text{сез}}$ (до 200 м) выявлены в зоне ФБТ (25° ю.ш.), при этом максимум самих сезонных колебаний солености (СКО и $A_{\text{год}}$) просле-

живается севернее этого фронта, где располагается высокосоленая СБТВ. Рост сезонных колебаний солености и незначительное увеличение значений $H_{\text{сез}}$ (до 150 м) отмечается также в рай-

оне $60 - 65^\circ$ ю.ш., в области интенсивных сезонных смещений границы антарктических льдов. На остальной части акватории значения $H_{\text{сез}}$ не превышают 100 м.



Р и с. 1. Горизонтальные меридиональные градиенты (слева направо) T , S , U_g , U на горизонтах 100, 200 и 300 м, МГТ на глубине $HT_{\text{мин}}$, МГС на глубинах $HS_{\text{мин}}$ и $HS_{\text{макс}}$ (а), вертикальные распределения (слева направо) T , S , U_g , U в феврале (б), их сезонных СКО (в) и амплитуд годовых гармоник (г) на разрезе вдоль 30° з.д. Стрелками показано положение основных фронтов и стрежней течений

Рассмотренные выше особенности глубины проникновения сезонного сигнала в полях T , S на разрезе вдоль 30° з.д. сохраняются и на других меридианах. Их циркумполярный характер хорошо прослеживается по пространственному распределению характеристик сезонной изменчивости главных признаков ($T_{\text{мин}}$, $S_{\text{мин}}$, $S_{\text{макс}}$, $HT_{\text{мин}}$, $HS_{\text{мин}}$ и $HS_{\text{макс}}$) водных масс (АЗВ, АПрВ и СБТМВ), границами которых являются АПФ, САФ и ЮСБТФ (рис. 2). Из рисунка видно, что области максимальных значений СКО и $A_{\text{год}}$ $T_{\text{мин}}$ и $S_{\text{мин}}$ наблюдаются южнее 50° ю.ш., т.е. АПФ, а также примерно вдоль 40° ю.ш. в зоне САФ. В то же время области высоких значений

СКО и $A_{\text{год}}$ $HT_{\text{мин}}$ смещены ближе к оси АПФ, а $HS_{\text{мин}}$ – к оси САФ.

Циркумполярное распределение характеристик изменчивости $S_{\text{макс}}$ отличается от распределений $T_{\text{мин}}$ и $S_{\text{мин}}$. Максимальные значения СКО и $A_{\text{год}}$ $S_{\text{макс}}$ во всех океанах наблюдаются на южных перифериях ЮСАК в зонах ЮСБТФ. Другой максимум значений СКО и $A_{\text{год}}$ $S_{\text{макс}}$ прослеживается в западных частях Атлантического и Индийского океанов в зоне САФ.

Отметим, что максимальные значения СКО и $A_{\text{год}}$ $HS_{\text{макс}}$ наблюдаются на перифериях областей высоких значений самого максимума солености и характеристик его сезонной изменчивости.

Распределение $H_{\text{сез}}$ в поле скорости течений носит более сложный характер, чем в термохалинных полях (рис. 1). Тем не менее, можно выделить ряд закономерностей, характеризующих связь пространственных особенностей $H_{\text{сез}}$ с крупномасштабными течениями. По геострофическим расчетам в районе 60° ю.ш. в верхнем 100-метровом слое прослеживается слабый поток восточного направления. Согласно существующим представлениям здесь проходит Южная ветвь Антарктического циркумполярного течения (ЮВ АЦТ) [4]. В распределении СКО и $A_{\text{год}}$ геострофических и модельных скоростей к северу и югу от этой ветви АЦТ наблюдаются слабые максимумы.

В общем случае, как для U_g , так и для U , величины $H_{\text{сез}}$ резко возрастают севернее 60° ю.ш. Здесь на большей части разреза они превышают 500 – 700 м, а на некоторых участках достигают 1000 м и более (рис. 1). При этом экстремальные значения СКО и $A_{\text{год}}$ для U_g выше, чем для U .

Для U_g максимальная глубина $H_{\text{сез}}$ (~ 1500 м) по распределениям СКО_{сез} и $A_{\text{год}}$ наблюдается в районе $47 - 48^\circ$ ю.ш. несколько севернее стрежня Центральной ветви Антарктического циркумполярного течения (ЦВ АЦТ). Для U значение $H_{\text{сез}}$ в этом районе уменьшается до 1000 м, а максимальные значения $H_{\text{сез}}$ (~ 1400 м) прослеживаются севернее (около 42° ю.ш.) у северной границы Северной ветви АЦТ (СВ АЦТ). Таким образом, отмечается тенденция к смещению максимальных значений СКО, $A_{\text{год}}$ и $H_{\text{сез}}$ от стрежней основных течений к их перифериям. Это свидетельствует о том, что наибольшей сезонной изменчивости подвержены границы течений.

Для U и U_g отмечается увеличение $H_{\text{сез}}$ (до 1500 м) к северу от 30° ю.ш. По распределению U_g в районе 25° ю.ш. в верхнем слое 0 – 100 м выделяется поток восточного направления, который на этом меридиональном разрезе можно идентифицировать как Рециркуляционную ветвь Бразильского течения (РВ БТ) [4], в зоне которой наблюдаются максимумы СКО и $A_{\text{год}}$ зональной геострофической скорости. По распределению характеристик модельных скоростей РВ БТ

не прослеживается. Глубже 100 м в северной части разреза по геострофическим и модельным скоростям преобладает поток западного направления, который представляет глубинную часть Южного пассатного течения. Несмотря на слабые скорости, сезонная изменчивость здесь проникает достаточно глубоко.

Таким образом, наряду с общими закономерностями, в распределениях величин СКО, $A_{\text{год}}$ и $H_{\text{сез}}$ зональных геострофических и модельных скоростей наблюдаются некоторые различия. Они связаны, главным образом, с особенностями расчета течений по геострофическому соотношению и по модели циркуляции океана *HOPE*. Последняя, кроме контактных гидрологических измерений, усваивает инструментальные измерения течений и альтиметрические данные аномалий уровня океана, а также учитывает дрейфовую составляющую скорости [10].

Заключение. На основе среднемесячных гидрологических данных океанического реанализа *ECMWF ORA-S3* показано, что максимальная глубина проникновения сезонных колебаний в термохалинных полях Южного океана (450 м) прослеживается в зоне Субантарктического фронта. К югу от Антарктического полярного фронта и в зоне Южного субтропического фронта глубина проникновения сезонных колебаний может достигать 200 м. На остальной части акватории Южного океана она не превышает 100 м.

Показано, что особенности сезонной изменчивости главных признаков Антарктической зимней, Антарктической промежуточной и Субтропической модовой водных масс (подповерхностных минимумов температуры и солености, максимума солености, глубин их залегания) носят циркумполярный характер. Области максимальных значений внутрigoдовых СКО и амплитуд годовых гармоник подповерхностных минимумов температуры и солености наблюдаются южнее Антарктического полярного фронта и в зоне Субантарктического фронта. В то же время области высоких значений СКО и $A_{\text{год}}$ глубины залегания минимума температуры расположены на оси АПФ, а минимума солености – на

оси САФ. Максимальные значения внутрigoдового СКО и амплитуды годовой гармоника подповерхностного максимума солености во всех океанах наблюдаются на южных перифериях ЮСАК в зонах Южного субтропического фронта. Заметное увеличение значений СКО и $A_{\text{год}}$ прослеживается также в западных частях Атлантического и Индийского океанов в зоне Субантарктического фронта. Максимальные значения СКО и $A_{\text{год}}$ глубины залегания $S_{\text{макс}}$ наблюдаются на перифериях областей высоких значений самого максимума солености и характеристик его сезонной изменчивости.

Показано, что распределение глубины проникновения сезонных колебаний в поле зональной составляющей скорости течений носит более сложный характер, чем в термохалинных полях. В общем случае, как для геострофической скорости, так и для модельной скорости, глубина проникновения сезонных колебаний резко возрастает севернее 60° ю.ш. Здесь на большей части акватории она превышает 500 – 700 м, а на некоторых участках достигает 1000 м и более.

Показано, что наибольшей сезонной изменчивости подвержены границы течений. Для геострофической скорости максимальная глубина $H_{\text{сез}}$ (~ 1500 м) наблюдается несколько севернее стрежня Центральной ветви Антарктического циркумполярного течения. Для модельной скорости значение $H_{\text{сез}}$ в этом районе уменьшается до 1000 м. При этом максимальные значения $H_{\text{сез}}$ (~ 1400 м) прослеживаются у северной границы Северной ветви Антарктического циркумполярного течения. К северу от 30° ю.ш. глубже 100 метров преобладает поток западного направления, который представляет глубинную часть Южного пассатного течения. Несмотря на слабые скорости, сезонная изменчивость здесь проникает достаточно глубоко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 6. – С. 62 – 73.

2. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. Сезонная и межгодовая изменчивость водных масс в проливе Дрейка // Украинский Антарктический журнал. – 2011/2012. – № 10 – 11. – С. 161 – 171.
3. 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.
4. Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Циркуляция и структура вод юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Антарктики. Монография. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2008. – 116 с.
5. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А. Сезонная изменчивость полей температуры и солености в юго-западной части Атлантического океана // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2003. – С. 102 – 107.
6. Артамонов Ю.В., Федирко А.В. Сезонная изменчивость Антарктической зимней и Антарктической промежуточной водных масс к югу от Африки // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2011. – Вып. 16. – С. 155 – 161.
7. Valentine H.R., Lutjeharms J.R.E., Brundrit G.B. The water masses and volumetry of the southern Agulhas Current region // Deep-Sea Research. – Part I. – 1993. – 40. – № 6. – P. 1285 – 1305.
8. Rintoul S.R., Donguy J.R., Roemmich D.H. Seasonal evolution of upper ocean thermal structure between Tasmania and Antarctica // Deep-Sea Research. – Part I. – 1997. – 44. – № 7. – P. 1185 – 1202.
9. <ftp://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORAS3>.
10. Wolff J., Maier-Reimer E., Legutke S. The Hamburg Ocean Primitive Equation model. – Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum Tech. Rep., 1997. – № 13. – 98 p.