

Научная статья
УДК 551.465.432 (269.4)
EDN ZDFRLB

Структура и климатическая внутригодовая изменчивость характеристик водных масс в котловине Пауэлл и на прилегающем шельфе Антарктического полуострова

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева *, Н. В. Никольский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: sea-ant@yandex.ru*

Аннотация

По среднемесячным значениям потенциальной температуры и солёности для каждого года с 1958 по 2021 г. из реанализа *ECMWF ORA-S5* проанализированы среднегодовалая структура и климатическая внутригодовая изменчивость характеристик водных масс котловины Пауэлл и прилегающих акваторий. Показано, что антарктическая шельфовая вода наблюдается не только над мелководным шельфом архипелага Жуэнвиль, но и над свалом глубин в северо-западной части моря Уэдделла. Выявлено, что слой циркумполярной глубинной воды разделяется на верхнюю и нижнюю модификации. Глубинная и донная воды моря Уэдделла в виде отдельных экстремумов на среднегодовалых θ, S -кривых не проявляются. Показано, что в центре циклонического круговорота в котловине Пауэлл ядро антарктической зимней воды располагается в слое 25–55 м. В море Скоша, желобе Гесперид и над хребтом Филипп оно заглубляется до 60–85 м. Минимальные глубины залегания ядер верхней и нижней модификаций циркумполярной глубинной воды (соответственно 250–300 и 500–600 м) наблюдаются в центральной части котловины Пауэлл и ближе к центру круговорота моря Уэдделла, максимальные глубины (соответственно 1000–1300 и 1100–1500 м) – над свалами глубин шельфа Жуэнвиль и хребтов Южный Скоша, Филипп и Жуэнвиль. Показано, что сезонные изменения θ -индекса антарктической поверхностной воды максимальны (3.5–4 °C) в южной части моря Скоша и в желобе Гесперид, S -индекса (1.8–1.9 ЕПС) – над хребтом Филипп и в северной и южной частях котловины Пауэлл. Внутригодовые изменения θ, S -индексов антарктической шельфовой воды достигают 1.6–1.8 °C и 1.5 ЕПС соответственно. Поверхностная вода моря Уэдделла характеризуется слабыми изменениями θ -индекса, тогда как изменения ее S -индекса достигают почти 1.8 ЕПС. Внутригодовые изменения θ, S -индексов антарктической зимней воды максимальны в центральной части котловины Пауэлл (до 1 °C и 1.1 ЕПС).

Ключевые слова: Южный океан, море Уэдделла, котловина Пауэлл, антарктический шельф, водные массы, потенциальная температура морской воды, солёность, нейтральная плотность, пространственно-временная изменчивость, вертикальная структура вод

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» (шифр «Океанологические процессы»).

Для цитирования: Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Структура и климатическая внутригодовая изменчивость характеристик водных масс в котловине Пауэлл и на прилегающем шельфе Антарктического полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 22–39. EDN ZDFRLB.

Structure and Climatic Intra-Annual Variability of Water Mass Characteristics in the Powell Basin and on the Adjacent Antarctic Peninsula Shelf

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva *, N. V. Nikolskii

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: sea-ant@yandex.ru*

Abstract

The paper analyzes the long-term averaged structure and climatic intra-annual variability of water mass characteristics in the Powell Basin and adjacent water areas based on monthly averaged potential temperature and salinity data for each year from 1958 to 2021 from ECMWF ORA-S5 reanalysis. It is shown that the Antarctic Shelf Water is observed not only over the shallow shelf of the Joinville archipelago, but also over the continental slope in the northwestern Weddell Sea. It was revealed that the layer of Circumpolar Deep Water is divided into Upper and Lower modifications. The Deep and Bottom Waters of the Weddell Sea do not appear as separate extremes on the long-term average θ, S -diagrams. It is shown that in the center of the cyclonic gyre in the Powell Basin, the Antarctic Winter Water core is located in a layer of 25–55 m. In the Scotia Sea, the Hesperides Trough and above the Philip Ridge, the Antarctic Winter Water core deepens to 60–85 m. The minimum depths of the cores of the Upper and Lower modifications of the Circumpolar Deep Water (250–300 m and 500–600 m, respectively) are observed in the central part of the Powell Basin and closer to the center of the Weddell Sea Gyre, the maximum depths (1000–1300 m and 1100–1500 m, respectively) are observed over the slopes of the depths of the Joinville shelf and the South Scotia, Philip, and Joinville Ridges. It is shown that seasonal changes in the θ -index of the Antarctic Surface Water are maximum (3.5–4°C) in the southern Scotia Sea and in the Hesperides Trough. Seasonal changes in the S -index are maximum (1.8–1.9 psu) over the Philip Ridge and in the northern and southern parts of the Powell Basin. Intra-annual changes in the θ, S -indices of the Antarctic Shelf Water reach 1.6–1.8 °C and 1.5 psu, respectively. The Weddell Sea Surface Water is characterized by weak changes in the θ -index, while changes in its S -index reach almost 1.8 psu. Intra-annual changes in the θ, S -indices of Antarctic Winter Water are maximum in the central part of the Powell Basin (up to 1 °C and 1.1 psu).

Keywords: Southern Ocean, Weddell Sea, Powell Basin, Antarctic shelf, water masses, potential water temperature, salinity, neutral density, spatiotemporal variability, vertical water structure

Acknowledgements: The work was carried out under FSBSI FRC MHI state assignment FNNN-2021-0004 «Fundamental studies of oceanological processes which determine the state and evolution of the marine environment influenced by natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods» («Oceanological processes» code).

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Nikolskii, N.V., 2023. Structure and Climatic Intra-Annual Variability of Water Mass Characteristics in the Powell Basin and on the Adjacent Antarctic Peninsula Shelf. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 22–39.

Введение

Водные массы и их границы (гидрологические фронты) являются важнейшими абиотическими факторами, определяющими уровень биопродуктивности вод, оказывая влияние на пространственное распределение биогенов [1–7]. Наиболее биопродуктивным районом является юго-западная часть Атлантического сектора Южного океана, где на обширном шельфе Антарктического п-ова происходит нерест антарктического криля. Криль, переносимый из мест нереста вдоль западной периферии круговорота моря Уэдделла (КМУ), скапливается в котловине Пауэлл [8–10]. Далее основной перенос скоплений криля осуществляется по северной периферии КМУ, проходящей вдоль хребтов Филипп и Южный Скоша, ограничивающих котловину Пауэлл с севера [2, 3, 5]. Промысловая значимость шельфовых районов Антарктического п-ова, северо-западной части моря Уэдделла и котловины Пауэлл обусловила появление целого ряда работ, посвященных исследованию процессов формирования, модификации и распространения водных масс в этом регионе ¹⁾ [2, 10–21].

Результаты исследований показали, что в целом вертикальная структура вод здесь характеризуется следующими особенностями ¹⁾ [1, 2, 11–14, 17–20]. В верхнем слое располагаются антарктические поверхностные воды (АПВ), состоящие из двух модификаций вод. Это относительно теплые и распределенные, хорошо перемешанные летние воды (АПЛВ) и более холодные и соленые зимние воды (АПЗВ). Глубже наблюдается подповерхностный слой антарктической зимней воды (АЗВ), характеризующийся минимальной температурой и представляющей собой остатки предыдущего зимнего верхнего перемешанного слоя АПЗВ. Ниже залегает слой циркумполярной глубинной воды (ЦГВ), которая к югу от системы Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), согласно терминологии некоторых авторов [12, 14, 15, 20], носит название «теплая глубинная вода» (ТГВ). В верхней части слоя ЦГВ определяется по максимуму температуры (верхняя ЦГВ), а на промежуточных глубинах – по максимуму солености (нижняя ЦГВ). Отметим, что некоторые авторы считают, что в области КМУ невозможно разделить слой ЦГВ на верхнюю и нижнюю модификации [2]. Другие авторы [18] считают, что южнее системы АЦТ весь слой ЦГВ занимает ее нижняя модификация, характеризующаяся максимумом солености.

¹⁾ Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Водные массы и циркуляция Южного океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. 288 с.

В работе [20] в котловине Пауэлл были выделены три модификации ТГВ с различными термохалинными характеристиками: верхняя, средняя и нижняя. Под слоем ЦГВ залегает слой глубинной воды моря Уэдделла (ГВМУ), под которой находится слой донной воды моря Уэдделла (ДВМУ). ГВМУ из котловины Пауэлл через глубоководные проходы окружающих ее поднятий дна проникает на север в желоб Гесперид и в море Скоша [2, 15–18], в то время как ДВМУ не распространяется за пределы КМУ [17, 22].

На мелководных шельфах, окружающих котловину Пауэлл, формируются антарктические шельфовые воды (АШВ) с температурой, близкой к точке замерзания морской воды. Они образуются в результате мощной осенне-зимней конвекции, приводящей к термической однородности во всем слое от поверхности до дна. Эти воды характеризуются пониженной соленостью летом при таянии морского льда над антарктическим шельфом и повышенной соленостью зимой при его формировании¹⁾ [1, 2, 11–14, 17, 19, 20].

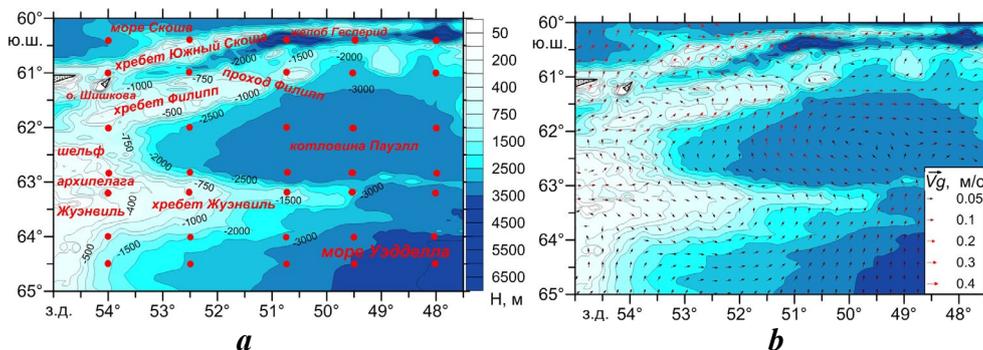
Отметим, что большинство исследований, в которых анализируется структура водных масс в рассматриваемом регионе, базируется на данных нерегулярных синоптических гидрологических измерений, проводимых вследствие суровых погодных условий преимущественно в теплый период и не всегда совпадающих по пространству. Анализ и идентификация водных масс по данным разрозненных синоптических съемок на отдельных разрезах и гидрологических станциях приводят к тому, что в работах различных авторов количество водных масс и их модификаций не совпадает [2, 18, 20].

В настоящее время постоянное пополнение баз фактических данных и увеличение длины временных рядов дистанционных измерений способствуют появлению современных версий океанических реанализов, в которых усваиваются все имеющиеся данные контактных и спутниковых измерений. Использование таких реанализов позволяет уточнить среднемноголетнюю пространственную структуру вод и дать оценки внутригодовых изменений характеристик водных масс, что необходимо для интерпретации особенностей структуры вод, полученных по результатам фактических экспедиционных измерений [9, 10, 19, 20, 23].

Цель настоящей работы – на основе данных океанического реанализа *ECMWF ORA-S5* проанализировать среднемноголетнюю пространственную структуру водных масс и исследовать климатическую внутригодовую изменчивость их характеристик в котловине Пауэлл и прилегающих акваториях (восточный шельф Антарктического п-ова и северо-западная часть моря Уэдделла).

Материалы и методы

В работе рассматривается район Южного океана к востоку от Антарктического п-ова, расположенный между 60° и 65° ю. ш. и 56° и 47.5° з. д. Он включает в себя шельф архипелага Жуэнвиль, котловину Пауэлл, северо-западную часть моря Уэдделла, юго-западную часть моря Скоша. Котловина Пауэлл отделена от основного бассейна моря Уэдделла хребтом Жуэнвиль, а от моря Скоша – хребтами Южный Скоша и Филипп (рис. 1, а). При построении схемы донной топографии использовались данные *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)* (URL: http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) с пространственным разрешением 15 угловых секунд.



Р и с . 1 . Район исследования (а) и распределение среднемноголетних векторов геострофических течений (b). Красными точками отмечены узлы сетки, для которых на рис. 3 представлены примеры θ, S -кривых

Fig. 1. Study area (a) and distribution of long-term average vectors of geostrophic currents (b). The red dots show the grid nodes for which examples of θ, S -curves are presented in Fig. 3

Анализ термохалинной структуры вод и выделение водных масс проводились по данным реанализа *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts OCEAN5 system (ECMWF ORAS5)* (URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-oras5?tab=form>). Реанализ содержит среднемесячные значения потенциальной температуры θ ($^{\circ}\text{C}$) и солёности S (ЕПС) в узлах сетки примерно $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ на 75 вертикальных уровнях в *sigma*-координатах для каждого года за период с 1958 по 2021 г. Эти значения получены на основе модели океана *Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)* и системы ассимиляции океана *NEMOVAR*, усваивающей поверхностную и подповерхностную температуру, солёность, концентрацию морского льда и аномалии уровня моря [24]. По исходным данным были рассчитаны среднемноголетние и климатические среднемесячные значения потенциальной температуры и солёности. Для выделения ядер водных масс и их термохалинных индексов в каждом узле сетки были построены среднемноголетние и климатические среднемесячные θ, S -кривые. Количество водных масс согласно классическому T, S -анализу определялось на θ, S -кривой по количеству экстремумов плюс две концевые точки^{2), 3)} [25]. Для уточнения вертикальной структуры вод анализировались вертикальные распределения нейтральной плотности γ^n ($\text{кг}/\text{м}^3$), которая является функцией солёности, температуры *in situ*, давления, долготы и широты [26] и косвенно отражает положение границ водных масс. При оценке сезонной изменчивости термохалинных индексов водных масс анализировались пространственные распределения внутригодовых среднеквадратических отклонений (СКО) температуры и солёности.

Пространственные распределения характеристик водных масс интерпретировались на фоне особенностей геострофической циркуляции вод.

²⁾ Мамаев О. И. *T, S-анализ вод Мирового океана*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 364 с.

³⁾ Булгаков Н. П. *Конвекция в океане*. Москва : Наука, 1975. 272 с.

Среднегодовая структура течений анализировалась по данным реанализа *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* (URL: http://marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA-LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047), содержащего среднесуточные значения составляющих геострофической скорости в узлах регулярной сетки с шагом 0.25° с 1993 по 2020 г. По этим значениям рассчитывались среднемноголетние значения модуля скорости $\vec{V}g$ и направления векторов течений (рис. 1, *b*).

Основные результаты

Распределения среднемноголетних значений потенциальной температуры и солёности на вертикальных меридиональных разрезах и среднегодовые θ, S -кривые, примеры которых представлены на рис. 2 и 3, показали, что структура вод в районах исследуемой акватории, различающихся орографическими условиями, также заметно различается.

В глубоководных районах акватории, таких как южная часть моря Скоша, желоб Гесперид, котловина Пауэлл, северо-западная часть моря Уэдделла, прилегающая к антарктическому шельфу, прослеживается антарктический тип вертикальной структуры вод. На распределениях температуры (рис. 2, *a, c, e*) и среднемноголетних θ, S -кривых (рис. 3) севернее шельфа и хребта Жуэнвиль в слое примерно 25–150 м хорошо выделяется подповерхностный минимум θ , характеризующий АЗВ. Значения температуры в слое АЗВ заметно понижаются в глубоководных районах между хребтами Южный Скоша и Филипп и над свалами глубин хребта Жуэнвиль ($\theta < -1.5^\circ\text{C}$) и повышаются ($\theta < -1^\circ\text{C}$) в море Скоша, желобе Гесперид и центральной части котловины Пауэлл (рис. 2, *a, c, e*; 3). Распределение изолиний нейтральной плотности γ^n показывает, что за нижнюю границу АЗВ можно условно принять изопикну 27.95. В открытой части моря Уэдделла подповерхностный минимум, соответствующий АЗВ, в среднегодовом поле температуры не наблюдается, а весь приповерхностный слой занимает самая холодная ($\theta < -1.6^\circ\text{C}$) и низкосолёная ($S < 33.6$ ЕПС) АПВ высокоширотной модификации, называемая, согласно [2], поверхностной водой моря Уэдделла (ПВМУ) (рис. 2, *c-f*; 3, *b, c*).

Под слоем АЗВ в южной части моря Скоша отмечается рост температуры, и на глубинах 400–1000 м наблюдается ее промежуточный максимум ($\theta \sim 1-1.2^\circ\text{C}$), типичный для верхней модификации ЦГВ (ВЦГВ) (рис. 2, *a*; 3, *a*). Под слоем температурного максимума на глубинах 700–1400 м наблюдается слабый максимум солёности (34.7–34.705 ЕПС), характеризующий нижнюю модификацию ЦГВ (НЦГВ) (рис. 2, *b*; 3, *a*). Верхняя граница слоя ВЦГВ качественно соответствует положению изопикны 28.05, верхняя граница НЦГВ – положению изопикны 28.1, что согласуется с результатами работы [18]. В то же время выделение двух модификаций ЦГВ (верхней и нижней) в южной части моря Скоша уточняет результаты этой работы, согласно которым к югу от системы АЦТ весь слой ЦГВ занимает ее нижняя модификация. К югу от хребта Южный Скоша над свалами глубин хребта Филипп и шельфа Жуэнвиль отмечается повышение температуры, соответствующее ВЦГВ, прослеживающееся практически до дна (рис. 2, *a*).

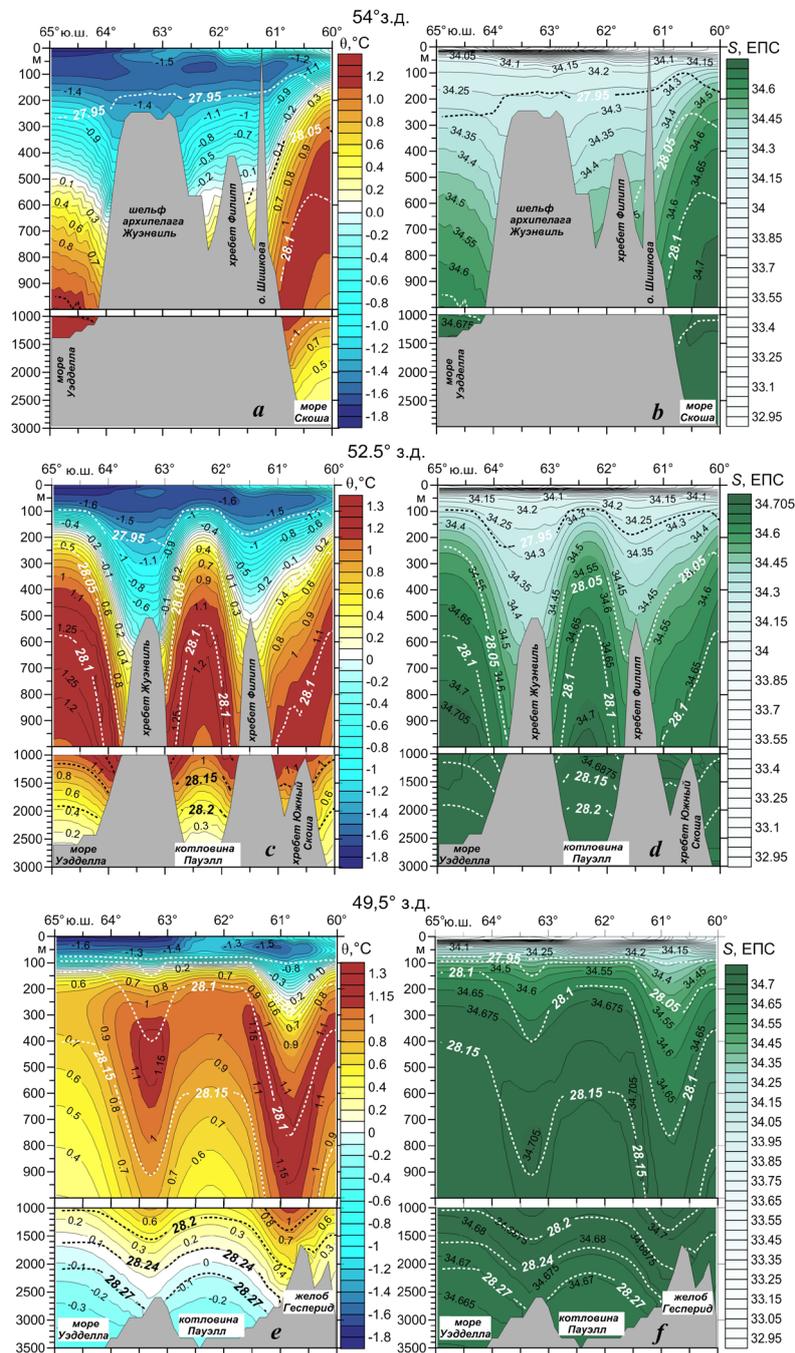


Рис. 2. Вертикальные распределения среднегоголетних значений потенциальной температуры (*a, c, e*) и солёности (*b, d, f*) на разрезах вдоль линий меридианов 54° з. д. (*a, b*), 52.5° з. д. (*c, d*) и 49.5° з. д. (*e, f*). Штриховой линией показаны изолинии нейтральной плотности σ_{θ}^n

Fig. 2. Vertical distributions of annual averaged potential temperature (*a, c, e*) and salinity (*b, d, f*) at sections along 54° W (*a, b*), 52.5° W (*c, d*) and 49.5° W (*e, f*). The dashed line shows neutral density σ_{θ}^n isolines

Глубже слоя НЦГВ в южной части моря Скоша наблюдается монотонное понижение температуры при однородном распределении солёности, соответствующее более холодной ($\theta < 0.5$ °С) и менее солёной ($S < 34.7$ ЕПС) ГВМУ (рис. 2, *a, b*; 3, *a*). Согласно распределению векторов геострофических течений (см. рис. 1, *b*) и результатам работ [2, 15–18], ГВМУ проникает в море Скоша из моря Уэдделла и котловины Пауэлл через глубоководные проходы хребтов Филипп и Южный Скоша. Верхняя граница ГВМУ здесь примерно соответствует положению изопикны 28.15 (рис. 2, *a, b*; 3, *a*).

Восточнее, в глубоководных районах, расположенных между хребтами Южный Скоша, Филипп, Жуэнвилль (море Скоша, котловина Пауэлл, море Уэдделла), вследствие циклонической направленности потоков (см. рис. 1, *b*) прослеживается заметный подъем слоя ЦГВ ближе к поверхности (рис. 2, *c–f*).

В центральной части котловины Пауэлл и в глубоководной части моря Уэдделла ближе к центру КМУ верхние и нижние границы ВЦГВ и НЦГВ, судя по положению слоев промежуточных максимумов температуры и солёности и изопикн нейтральной плотности γ^n 28.05, 28.1 и 28.15, располагаются примерно на 500–600 м выше, чем над свалами глубин (рис. 2, *e, f*; 3, *c*). Вследствие интенсивного подъема более холодных вод промежуточный температурный максимум ослабевает, температура в слое ВЦГВ понижается примерно на 0.2–0.3 °С (рис. 2, *e*). Отметим, что в море Уэдделла в нижней части слоя ЦГВ прослеживается слабый максимум солёности, что, в отличие от работы [2], позволяет разделить слой ЦГВ на верхнюю и нижнюю модификации.

Под слоем ЦГВ глубже 1500–2000 м прослеживаются монотонное понижение температуры и однородное распределение солёности, соответствующее ГВМУ и ДВМУ (рис. 2, *c–f*). На среднемноголетних θ, S -кривых отсутствуют явно выраженные экстремумы, которые бы позволили разделить эти водные массы (рис. 3, *b, c*). Согласно [18], слой ДВМУ отделяется от слоя глубинной воды моря Уэдделла по положению изолиний нейтральной плотности $\gamma^n > 28.24$ –28.27. Эта граница хорошо проявляется на вертикальных разрезах температуры и солёности, проходящих над глубоководными частями котловины Пауэлл и моря Уэдделла, при этом значения температуры и солёности в слое ДВМУ заметно понижаются по сравнению с их значениями в слое ГВМУ соответственно до -0.5 ... 0.1 °С и 34.66–34.675 ЕПС (рис. 2, *e, f*). Концевую точку на θ, S -кривых в этих районах мы идентифицируем как ядро ДВМУ, а ядро ГВМУ в виде экстремума явно не выделяется (рис. 3, *c*).

Над мелководным шельфом архипелага Жуэнвилль с глубинами менее 300 м среднемноголетняя вертикальная стратификация вод имеет свои особенности. Здесь АШВ характеризуется слабым подповерхностным повышением температуры примерно на 0.1–0.2 °С в слое 20–30 м (рис. 2, *a*; 3, *a*) и постепенным повышением солёности с глубиной (рис. 2, *b*). Появление слабой температурной инверсии в подповерхностном слое при положительном вертикальном градиенте солёности в прибрежных шельфовых областях отмечалось и ранее в работе [27]. Отметим, что следы АШВ с инверсией θ до 0.15 °С в подповерхностном слое 15–25 м наблюдаются над свалом глубин в северо-западной части моря Уэдделла (рис. 3, *b*). Южнее 64° ю. ш. температура и солёность монотонно повышаются с глубиной до дна (рис. 2, *a, b*), при этом распределение изопикн нейтральной плотности γ^n показало, что на глубинах 950–1100 м располагается изопикна 28.05, соответствующая верхней границе ВЦГВ.

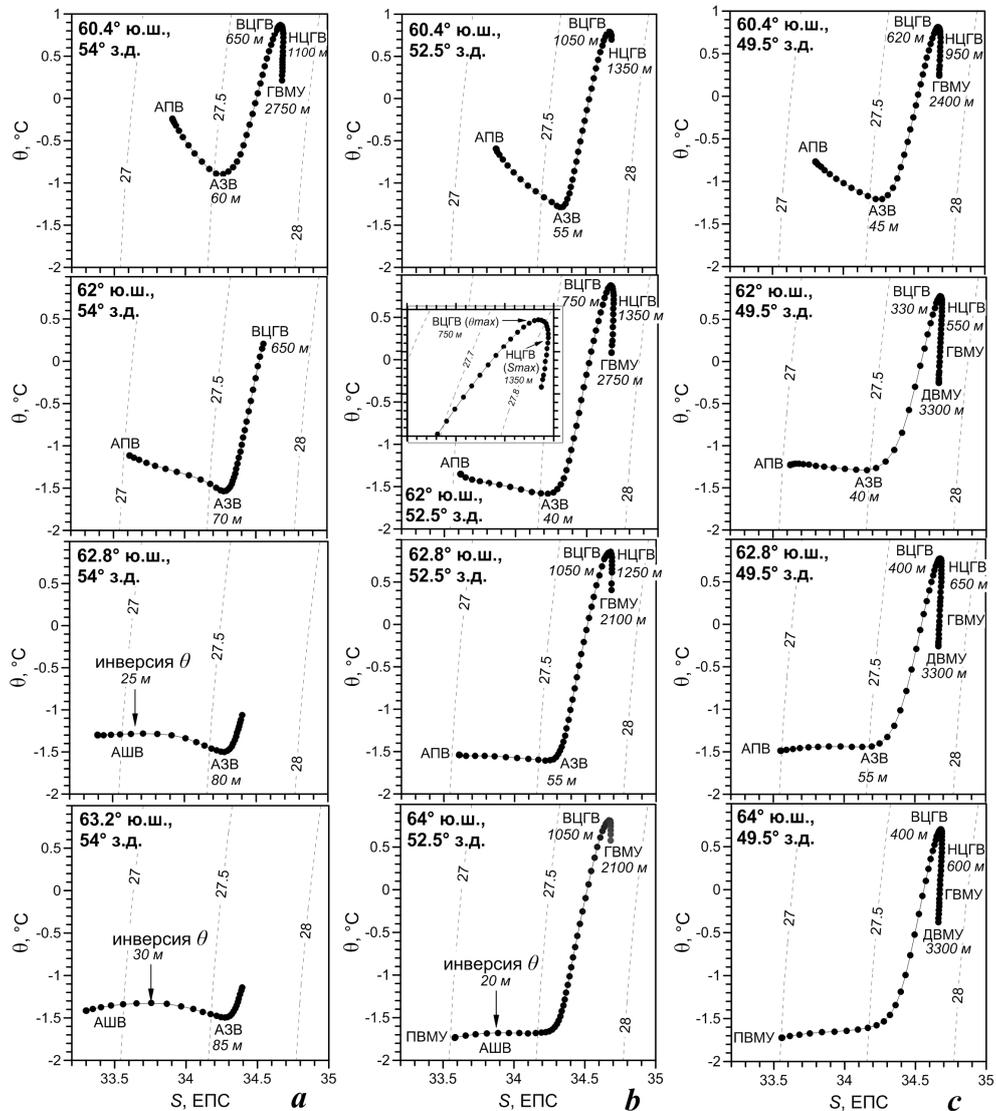


Рис. 3. Примеры среднемноголетних θ, S -кривых в отдельных узлах сетки, расположенных на меридианах 54° з. д. (a), 52.5° з. д. (b) и 49.5° з. д. (c). Числа у кривых – глубины залегания ядер водных масс (м). Пунктирные линии – изопикны условной плотности σ_t . На врезке представлен увеличенный фрагмент θ, S -кривой, показывающий промежуточные максимумы температуры и солёности

Fig. 3. Examples of annual average θ, S -curves in separate grid nodes located at 54° W (a), 52.5° W (b) and 49.5° W (c). The numbers next to the curves are the depths of the water mass cores (m). The dashed lines are isopycnals of conditional density σ_t . The inset shows an enlarged fragment of the θ, S -curve showing the presence of intermediate temperature and salinity maxima

Распределения термохалинных индексов ядер ВЦГВ и НЦГВ, определяемых соответственно как промежуточные максимумы температуры и солёности, и глубин их залегания (рис. 4) наглядно иллюстрируют качественную связь их пространственной изменчивости с особенностями рельефа дна и основными элементами циркуляции. Минимальные значения θ -индекса ВЦГВ наблюдаются над мористой кромкой шельфов архипелага Жуэнвиль и хребта Филипп с глубинами менее 800 м, а также в море Уэдделла ближе к центру КМУ, где они составляют соответственно 0.4–0.5 °C и 0.5–0.7 °C. Понижение температуры ядра ВЦГВ (1.05–1.1 °C), связанное как с циклоническим подъемом вод, так и с проникновением более холодных вод из моря Уэдделла (рис. 1, *b*), отмечается в глубоководной части котловины Пауэлл. В южной части моря Скоша и над свалами глубин шельфов архипелага Жуэнвиль и хребта Филипп с глубинами более 1500 м значения θ -индекса увеличиваются до 1.15–1.35 °C (рис. 4, *a*). У θ -индекса НЦГВ диапазон пространственной

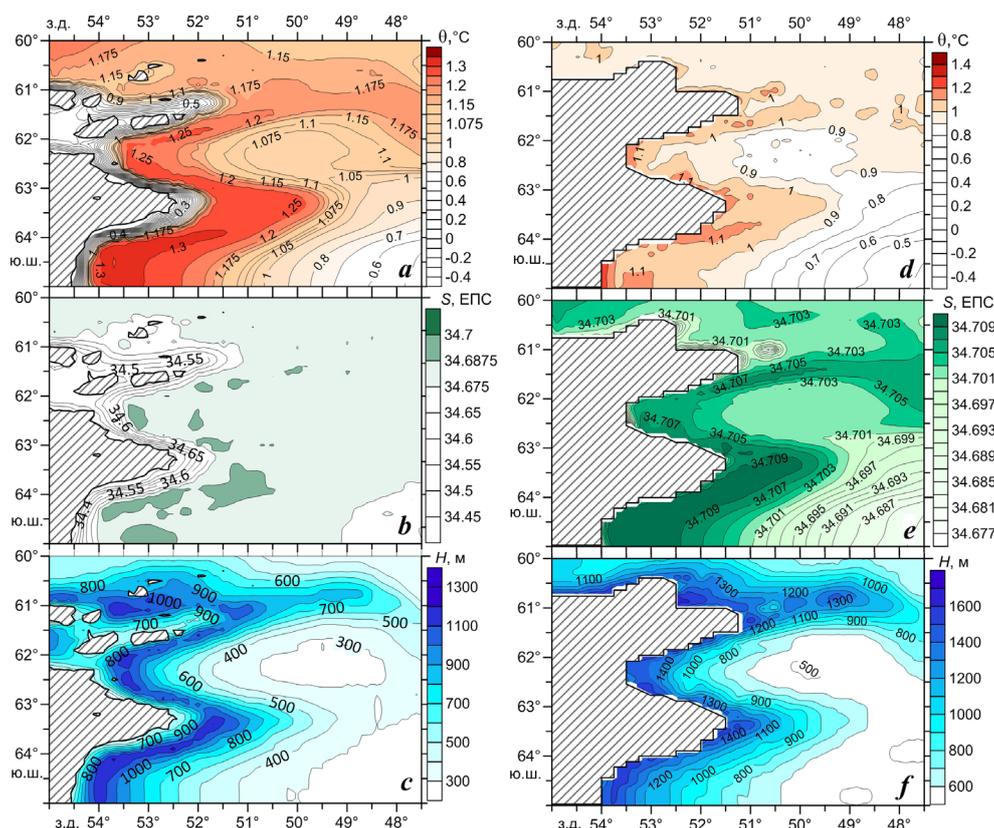


Рис. 4. Пространственные распределения θ -индексов (*a*, *d*), *S*-индексов (*b*, *e*) и глубин залегания ядер *H* (*c*, *f*) верхней (*a* – *c*) и нижней (*d* – *f*) модификаций ЦГВ. Области, где отсутствуют ВЦГВ и НЦГВ, заштрихованы

Fig. 4. Spatial distributions of θ -indices (*a*, *d*), *S*-indices (*b*, *e*) and core depths *H* (*c*, *f*) of the Upper (*a* – *c*) and Lower (*d* – *f*) modifications of CDW. The areas, where UCDW and LCDW are absent, are shaded

изменчивости заметно ниже, чем у θ -индекса ВЦГВ. При этом также отмечается тенденция к понижению значений θ -индекса НЦГВ в области КМУ (0.5–0.7 °С) и в центральной части котловины Пауэлл (0.85–0.9 °С) и повышению над свалами глубин (до 1–1.1 °С) (рис. 4, *d*).

Пространственная изменчивость S -индекса ВЦГВ на большей части акватории (в морях Скоша и Уэдделла, котловине Пауэлл, желобе Гесперид) невелика, его значения изменяются в пределах 34.675–34.69 ЕПС (рис. 4, *b*). Заметное уменьшение значений S -индекса ВЦГВ до 34.4–34.65 ЕПС, так же как и ее θ -индекса, наблюдается над кромкой шельфа с глубинами менее 800 м. Низкие значения θ, S -индекса ВЦГВ здесь можно объяснить трансформацией ВЦГВ вследствие ее перемешивания с более холодной и пресной шельфовой водой. Пространственные изменения значений S -индекса НЦГВ (рис. 4, *e*), который является ее отличительным признаком, характеризуются теми же особенностями, что и изменения θ -индекса ВЦГВ. Пониженные значения S -индекса ВЦГВ, как и θ -индекса ВЦГВ, отмечаются в области КМУ (34.685–34.697 ЕПС) и в центральной части котловины Пауэлл (34.701–34.703 ЕПС), повышенные (34.707–34.709 ЕПС) – над свалами глубин и в южной части моря Скоша (рис. 4, *e*).

Минимальные глубины залегания ядра ВЦГВ (меньше 300 м) наблюдаются в зонах циклонических круговоротов – в центральных частях котловины Пауэлл и моря Уэдделла. Над свалами глубин ядро ВЦГВ опускается до 1000–1300 м (рис. 4, *c*). Аналогичная пространственная изменчивость выявлена и для глубины залегания ядра НЦГВ. Она минимальна (500–600 м) в центральных частях котловины Пауэлл и моря Уэдделла и резко увеличивается (до 1100–1500 м) над свалами глубин (рис. 4, *f*). Качественно сходные пространственные особенности распределения несущих признаков верхней (θ -индекса) и нижней (S -индекса) модификаций ЦГВ, а также глубины залегания их ядер отражают влияние рельефа дна и циркуляции вод на весь слой воды, занимаемый ЦГВ.

Анализ распределений внутригодовых СКО потенциальной температуры и солености показал, что уровень сезонной изменчивости этих параметров заметно изменяется по пространству (рис. 5).

Внутригодовые колебания заметно уменьшаются глубже 60–70 м в поле температуры (рис. 5, *a – c*) и глубже 20–30 м в поле солености (рис. 5, *d – f*). Максимальный уровень внутригодовой изменчивости температуры наблюдается в верхнем 20–30-метровом слое в северной части акватории (в море Скоша, желобе Гесперид и над хребтом Южный Скоша), где значения СКО θ достигают 1–1.6 °С (рис. 5, *a – c*). Значения СКО θ уменьшаются в южном направлении и составляют 0.6–0.8 °С в котловине Пауэлл (рис. 5, *b, c*), 0.4–0.5 °С над шельфом Жуэнвиль (рис. 5, *a*). Минимальный уровень внутригодовой изменчивости температуры наблюдается в море Уэдделла, где значения СКО θ не превышают 0.2 °С (рис. 5, *a – c*).

Пространственное распределение внутригодового СКО солености заметно отличается от распределения СКО температуры. Максимальные значения СКО S отмечаются в районах интенсивного ледообразования и ледотаяния – над хребтом Филипп, шельфом и хребтом Жуэнвиль (0.5–0.8 ЕПС) (рис. 5, *d, e*), а также в глубоководной части моря Уэдделла (0.6–0.7 ЕПС) (рис. 5, *f*).

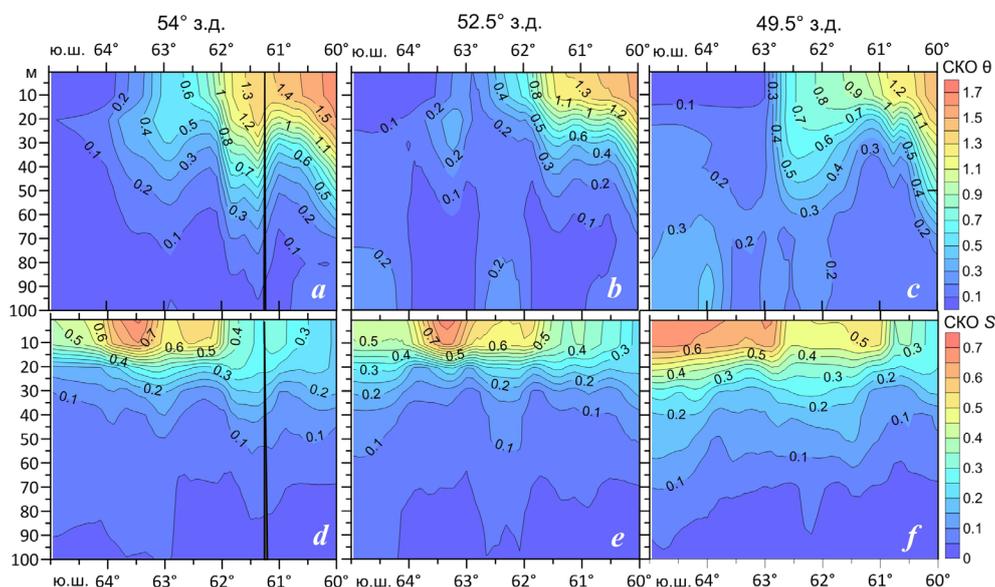


Рис. 5. Вертикальные распределения внутригодового СКО потенциальной температуры (*a – c*) и солёности (*d – f*) на разрезах вдоль линии меридианов 54° з. д. (*a, d*), 52.5° з. д. (*b, e*) и 49.5° з. д. (*c, f*). Темная полоса на рис. 5, *a, d* – о-в Шишкова

Fig. 5. Vertical distributions of intra-annual RMSD of potential temperature (*a – c*) and salinity (*d – f*) along 54° W (*a, d*), 52.5° W (*b, e*) and 49.5° W (*c, f*). The dark band in Fig. 5, *a, d* is Shishkov Island

Над свалами глубин в северо-западной части моря Уэдделла и в западной части котловины Пауэлл значения СКО *S* составляют 0.45–0.6 ЕПС (рис. 5, *d, e*), в центральной глубоководной части котловины Пауэлл они понижаются до 0.4–0.5 ЕПС (рис. 5, *f*). Минимальный уровень внутригодовой изменчивости солёности (СКО *S* < 0.2–0.4 ЕПС) наблюдается в районах максимального уровня внутригодовой изменчивости температуры – в море Скоша и желобе Гесперид (рис. 5, *d – f*).

Пространственные изменения уровня внутригодовой изменчивости термохалинных параметров отражаются в климатических сезонных изменениях θ, S -индексов водных масс. Анализ среднемесячных θ, S -кривых показал, что наибольшие внутригодовые изменения термохалинных индексов характерны для водных масс верхнего 60–70-метрового слоя океана, в котором наблюдаются максимальные сезонные вариации термохалинных полей (рис. 5; 6, *a*; 7). Наибольшие внутригодовые изменения термохалинных индексов отмечаются для АПВ, характеризующейся зимней (АПЗВ) и летней (АПЛВ) модификациями (рис. 6, *a*). Сезонные изменения температурного индекса АПВ максимальны в южной части моря Скоша, где они достигают почти 4°C . В желобе Гесперид изменения θ -индекса составляют 3.5°C , над хребтом Филипп и в северной и центральной частях котловины Пауэлл они уменьшаются до $2\text{--}2.5^\circ\text{C}$, в южной части котловины – до $1\text{--}1.1^\circ\text{C}$ (рис. 6, *b*). Внутригодовые изменения *S*-индекса АПВ максимальны над хребтом Филипп и в северной

и южной частях котловины Пауэлл, где они достигают почти 1.9 ЕПС. В море Скоша, желобе Гесперид и в центральной части котловины Пауэлл сезонные изменения S -индекса АПВ уменьшаются до 0.8–1 ЕПС (рис. 6, с).

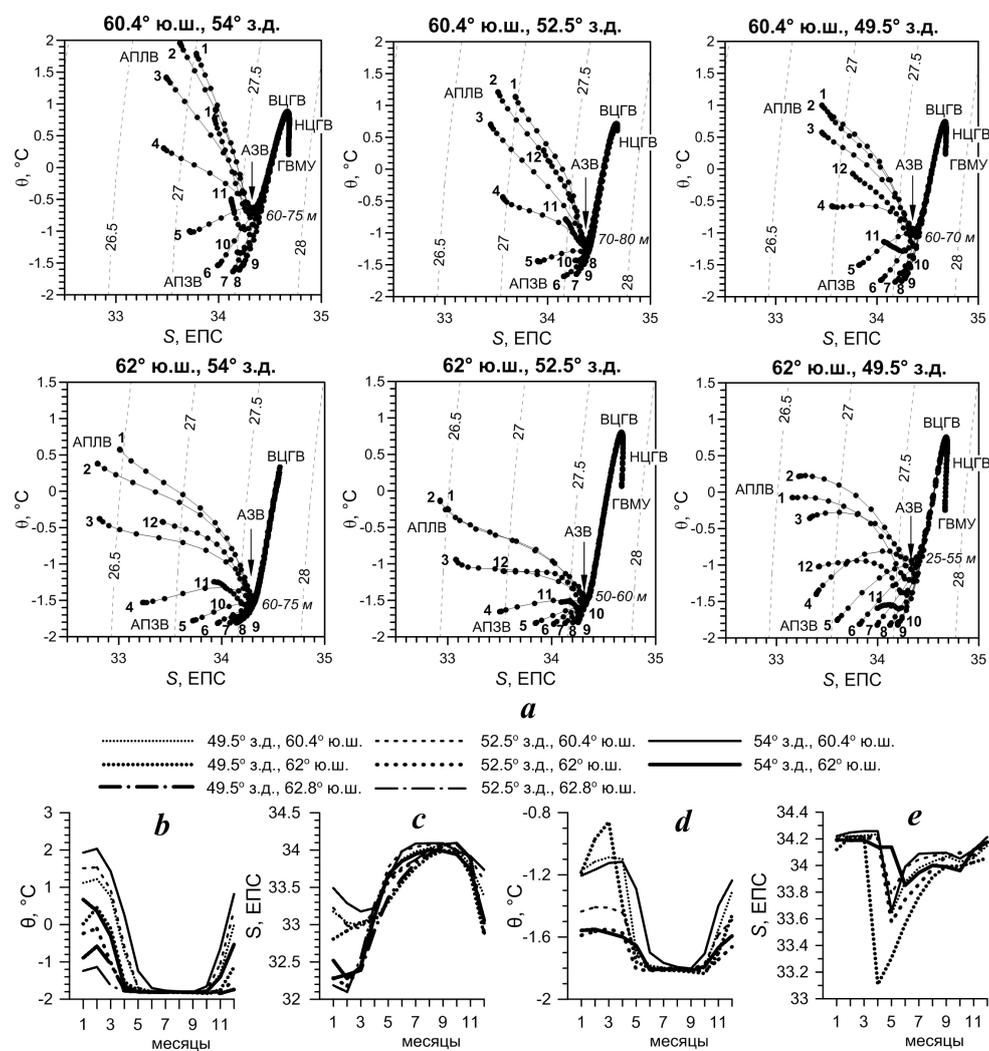


Рис. 6. Примеры среднемесячных θ , S -кривых в отдельных узлах сетки (а), графиков внутригодового цикла θ -индекса (b, d) и S -индекса (c, e) АПВ (b, c) и АЗВ (d, e). Числа у кривых – месяцы и глубины залегания ядра АЗВ (м)

Fig. 6. Examples of monthly average θ , S -curves in separate grid nodes (a) and graphs of the intra-annual cycle of the θ -index (b, d) and S -index (c, e) of the ASW (b, c) and AWW (d, e). The numbers at the curves in Figs. 6, a – months and depths of the AWW core (m)

Отметим, что на величину амплитуды внутригодовых изменений θ , S -индексов АПВ и ее пространственную изменчивость влияют преимущественно изменения θ , S -индексов летней модификации АПВ. Значения θ , S -индексов зимней модификации АПВ практически не изменяются на всей акватории и составляют в период с мая по октябрь $-1.8...-1.6$ °C и 34–34.1 ЕПС

(рис. 6, *b, c*). Значения θ -индекса летней модификации АПВ в январе – марте составляют 1.2–2 °С в море Скоша и желобе Гесперид, 0.6–0.8 °С над хребтом Филипп и понижаются до –0.2...0.4 °С в северной и центральной частях котловины Пауэлл и до –1.1...–0.6 °С в южной части котловины (рис. 6, *b*). Значения S -индекса АПЛВ составляют 32.1–32.5 ЕПС над хребтом Филипп и в северной и южной частях котловины Пауэлл, 32.8–33 ЕПС в центральной части котловины, 33.2–33.5 ЕПС в море Скоша и желобе Гесперид (рис. 6, *c*).

В море Уэдделла температурный индекс высокоширотной модификации АПВ – ПВМУ – в течение года изменяется от –1.85...–1.8 °С зимой до –1.2...–1.1 °С летом. Внутригодовые изменения S -индекса ПВМУ составляют почти 1.8 ЕПС (от 34.2–34.3 ЕПС зимой до 32.5–32.8 ЕПС летом) (рис. 7).

АЗВ прослеживается в подповерхностном слое в течение всего года в южной части моря Скоша, в желобе Гесперид, над хребтом Филипп, в северной и центральной частях котловины Пауэлл (рис. 6, *a*). Внутригодовые изменения θ, S -индексов АЗВ максимальны в центральной части котловины Пауэлл (до 1 °С и 1.1 ЕПС), где ядро АЗВ вследствие подъема вод в центре циклонического круговорота располагается ближе к поверхности в слое 25–55 м. Минимальные изменения θ, S -индексов АЗВ, не превышающие 0.4 °С и 0.3 ЕПС, наблюдаются в море Скоша, желобе Гесперид и над хребтом Филипп, где ядро АЗВ заглубляется до 60–85 м (рис. 6, *d, e*).

В южной части исследуемой акватории вследствие интенсивной конвекции в холодный период АЗВ прослеживается только часть года (рис. 7). Над шельфом Жуэнвилль АЗВ прослеживается с сентября – ноября по май – июнь, в южной части котловины Пауэлл – с ноября – декабря по апрель, в море Уэдделла – с декабря по март – апрель. В этих районах θ, S -индексы АЗВ слабо изменяются как по пространству, так и по времени и составляют соответственно –1.8...–1.4 °С и 34.1–34.2 ЕПС. Слабое повышение θ -индекса АЗВ (до –1.4...–1.1 °С) отмечается в южной части котловины Пауэлл (рис. 7).

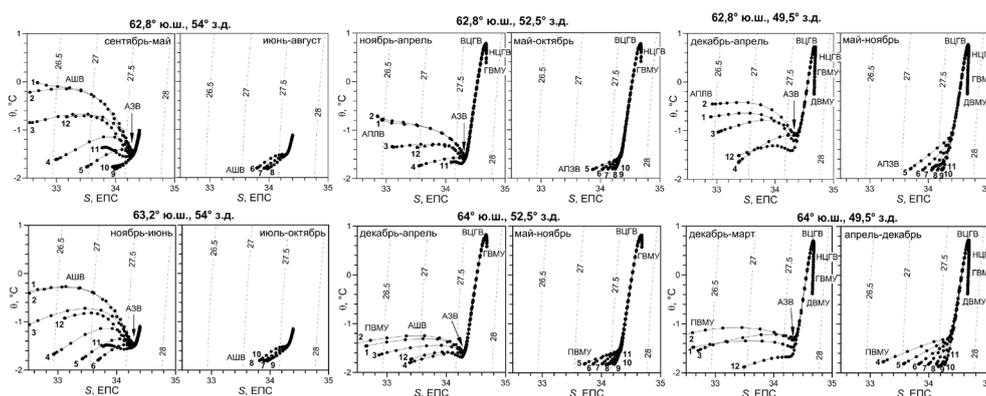


Рис. 7. Примеры среднемесячных θ, S -кривых в отдельных узлах сетки. Числа у кривых – месяцы

Fig. 7. Examples of monthly average θ, S -curves in separate grid nodes. The numbers at the curves are months

АШВ, как и АПВ, характеризуется существенными изменениями термохалинных индексов. Над шельфом Жуэнвиль внутригодовые изменения θ -индекса АШВ достигают 1.6–1.8 °С (от –1.8 °С зимой до –0.2...0 °С летом), изменения S -индекса составляют почти 1.5 ЕПС (от 33.9–34 до 32.5–32.6 ЕПС летом) (рис. 7).

Выводы

По данным реанализа *ECMWF ORAS5* за период с 1958 по 2021 г. проанализированы среднесезонная структура и климатическая внутригодовая изменчивость характеристик водных масс котловины Пауэлл и прилегающих акваторий. Идентифицированы АПВ и ее более холодная и менее соленая модификация – поверхностная вода моря Уэдделла, АШВ, АЗВ, ЦГВ, ГВМУ и ДВМУ. Показано, что АШВ наблюдается не только над мелководным шельфом архипелага Жуэнвиль, но и над свалом глубин в северо-западной части моря Уэдделла. Выявлено, что в глубоководных районах акватории слой ЦГВ разделяется на верхнюю и нижнюю модификации, характеризующиеся соответственно промежуточными максимумами температуры и солености. ГВМУ и ДВМУ в виде отдельных экстремумов на среднесезонных θ, S -кривых не проявляются.

Показано, что вследствие подъема вод в центре циклонического круговорота в котловине Пауэлл ядро АЗВ располагается ближе к поверхности в слое 25–55 м. В море Скоша, желобе Гесперид и над хребтом Филипп оно заглубляется до 60–85 м. Минимальные глубины залегания ядер ВЦГВ и НЦГВ (соответственно 250–300 и 500–600 м) также наблюдаются в центральной части котловины Пауэлл и в море Уэдделла ближе к центру КМУ. Максимальные глубины залегания ядер ВЦГВ и НЦГВ (соответственно 1000–1300 и 1100–1500 м) выявлены над свалами глубин шельфа Жуэнвиль и хребтов Южный Скоша, Филипп и Жуэнвиль.

Выявлено повышение значений θ -индекса ВЦГВ и S -индекса НЦГВ (до 1.15–1.35 °С и 34.707–34.709 ЕПС соответственно) в южной части моря Скоша и над свалами глубин шельфа архипелага Жуэнвиль и хребта Филипп с глубинами более 1500 м. Понижение температуры в ядре ВЦГВ и солености в ядре НЦГВ отмечается также в море Уэдделла (0.5–1 °С и 34.685–34.699 ЕПС) и в глубоководной части котловины Пауэлл (1.05–1.1 °С и 34.701–34.703 ЕПС). Минимальные значения θ -индекса ВЦГВ (0.4–0.7 °С) наблюдаются над кромкой шельфов архипелага Жуэнвиль и хребта Филипп с глубинами менее 800 м.

Наибольшими внутригодовыми изменениями термохалинных индексов характеризуется АПВ с зимней и летней модификациями. Сезонные изменения θ -индекса АПВ максимальны в южной части моря Скоша, где они достигают почти 4 °С, в желобе Гесперид они составляют 3.5 °С, над хребтом Филипп и в северной и центральной частях котловины Пауэлл уменьшаются до 2–2.5 °С, в южной части котловины – до 1–1.1 °С. Внутригодовые изменения S -индекса АПВ максимальны над хребтом Филипп и в северной и южной частях котловины Пауэлл, где они достигают почти 1.9 ЕПС. В море Скоша, желобе Гесперид и в центральной части котловины Пауэлл сезонные изменения S -индекса АПВ уменьшаются до 0.8–1 ЕПС.

ПВМУ характеризуется слабыми изменениями θ -индекса в течение года (от $-1.85...-1.8$ °С зимой до $-1.2...-1.1$ °С летом), тогда как изменения ее S -индекса достигают почти 1.8 ЕПС (от 34.2–34.3 ЕПС зимой до 32.5–32.8 ЕПС летом).

АШВ, так же как и АПВ, характеризуется существенными изменениями термохалинных индексов. Внутригодовые изменения θ -индекса АШВ достигают $1.6-1.8$ °С (от -1.8 °С зимой до $-0.2...0$ °С летом), изменения S -индекса составляют почти 1.5 ЕПС (от 33.9–34 до 32.5–32.6 ЕПС летом).

Внутригодовые изменения θ, S -индексов АЗВ максимальны в центральной части котловины Пауэлл (до 1 °С и 1.1 ЕПС), минимальны (до 0,4 °С и 0,3 ЕПС) – в море Скоша, желобе Гесперид и над хребтом Филипп. В южной части акватории АЗВ прослеживается не во все месяцы. Над шельфом Жуэнвиль АЗВ наблюдается с сентября – ноября по май – июнь, в южной части котловины Пауэлл – с ноября – декабря по апрель, в море Уэдделла – с декабря по март – апрель. В этих районах θ, S -индексы АЗВ слабо изменяются как по пространству, так и по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубравин В. Ф. Поверхностные водные массы и формирование зон биологической продуктивности Атлантического океана. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2001. 115 с.
2. Масленников В. В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. Москва : ВНИРО, 2003. 295 с.
3. Шульговский К. Е. Крупномасштабная изменчивость океанологических условий в западной части Атлантического сектора Антарктики и ее влияние на распределение криля. Калининград : АтлантНИРО, 2005. 148 с.
4. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea / H. Venables [et al.] // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012. Vol. 59–60. P. 14–24. doi:10.1016/j.dsr2.2011.08.012
5. Аржанова Н. В., Артамонова К. В. Гидрохимическая структура вод в районах промысла антарктического криля *Euphausia superba* Dana // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 118–132. EDN TGTNWF.
6. Lohmann R., Belkin I. M. Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: A review // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 128. P. 172–184. doi:10.1016/j.pocan.2014.08.013
7. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate / C. C. Chapman [et al.] // Nature Climate Change. 2020. Vol. 10. P. 209–219. doi:10.1038/s41558-020-0705-4
8. Siegel V., Watkins J. L. Distribution, biomass and demography of Antarctic Krill, *Euphausia superba* // Biology and Ecology of Antarctic Krill / Ed. V. Siegel. Cham : Springer, 2016. P. 21–100. doi:10.1007/978-3-319-29279-3_2
9. Состав популяции и транспорт молодежи антарктического криля в районе бассейна Пауэлла (северо-западная часть моря Уэдделла) в январе 2020 г. / В. А. Спиридонов [и др.] // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 33–51. EDN BZGUSV. doi:10.36038/2307-3497-2020-181-33-51
10. Исследования экосистемы Атлантического сектора Антарктики (79-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 823–825. EDN PNJEZI. doi:10.31857/S0030157420050172

11. Orsi A. H., Nowlin Jr. W. D., Whitworth III Th. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1993. Vol. 40, iss. 1. P. 169–203. doi:10.1016/0967-0637(93)90060-G
12. Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell Sea / E. Fahrbach [et al.] // Journal of Marine Research. 1995. Vol. 53, no. 4. P. 515–538. doi:10.1357/0022240953213089
13. Артамонов Ю. В., Попов Ю. И., Троценко Б. Г. Водные массы в Антарктическом секторе юго-западной Атлантики в феврале-апреле 1997 года // Бюллетень Українського антарктичного центру. Київ, 1997. Вип. 1 : Перша українська антарктична експедиція 1996–1997 рр. С. 125–131.
14. On the export of Antarctic bottom water from the Weddell Sea / A. C. Naveira Garabato [et al.] // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2002. Vol. 49, iss. 21. P. 4715–4742. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00156-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00156-X)
15. Northwestern Weddell Sea deep outflow into the Scotia Sea during the austral summers of 2000 and 2001 estimated by inverse methods / B. C. Franco [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2007. Vol. 54, iss. 10. P. 1815–1840. doi:10.1016/j.dsr.2007.06.003
16. Thompson A. F., Heywood K. J. Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2008. Vol. 55, iss. 10. P. 1229–1251. doi:10.1016/j.dsr.2008.06.001
17. Тараканов Р. Ю. Антарктическая донная вода в моря Скотия и проливе Дрейка // Океанология. 2009. Т. 49, № 5. С. 658–672. EDN KWISGP.
18. Water mass pathways and transports over the South Scotia Ridge west of 50°W / M. Palmer [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2012. Vol. 59. P. 8–24. doi:10.1016/j.dsr.2011.10.005
19. Мезомасштабная изменчивость океана в северной части моря Уэдделла / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 663–679. EDN AIGCWM. doi:10.31857/S0030157420050184
20. Fedotova A. A., Stepanova S. V. Water Mass Transformation in the Powell Basin // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Cham : Springer, 2021. P. 115–129. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_8
21. Мухаметьянов Р. З., Фрей Д. И. Мезомасштабная изменчивость характеристик водных масс и течений в северной части моря Уэдделла (бассейн Пауэлла) // Комплексные исследования Мирового океана : материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 18-24 апреля 2021 г. Москва : ИО РАН, 2021. С. 139. doi:10.29006/978-5-6045110-3-9
22. Orsi A. H., Whitworth III Th., Nowlin Jr. W. D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. Vol. 42, iss. 5. P. 641–673. doi:10.1016/0967-0637(95)00021-W
23. Гидрофизические и экосистемные исследования в Атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 5. С. 825–827. EDN KDLDIS. doi:10.31857/S003015742205015X
24. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment / H. Zuo [et al.] // Ocean Science. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 779–808. doi:10.5194/os-15-779-2019
25. Добровольский А. Д. Об определении водных масс // Океанология. 1961. Т. 1, вып. 1. С. 12–24. URL: http://www.mmtk.ginras.ru/pdf/dobrovolsky_1961.pdf (дата обращения: 12.08.2023).

26. *Jackett D. R., McDougall T. J. A Neutral Density Variable for the World's Oceans // Journal of Physical Oceanography. 1997. Vol. 27, iss. 2. P. 237–263. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<0237:ANDVFT>2.0.CO;2*
27. Вертикальная термохалинная структура, водные массы и крупномасштабные фронты Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики / Ю. В. Артамонов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 3. С. 39–52. EDN YYFZEL.

Поступила 29.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 18.05.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, *artam-ant@yandex.ru*

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, *sea-ant@yandex.ru*

Никольский Николай Викторович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ResearcherID: AAC-7723-2020**, *nikolsky.geo@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Артамонов Юрий Владимирович – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, разработка методик, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, формулирование выводов

Скрипалева Елена Александровна – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обработка и описание результатов исследования, обсуждение результатов работы, формулирование выводов, подготовка текста статьи, доработка текста

Никольский Николай Викторович – разработка и отладка компьютерных программ для обработки данных, компьютерная реализация алгоритмов, построение графиков и схем, участие в обсуждении материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.