

УДК 551.466

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ВОД В ПРОЛИВЕ АНТАРКТИКА

© 2023 г. О. А. Зуев¹, *, Д. И. Фрей¹, И. Д. Дрозд^{1, 2}, В. А. Кречик¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширинова Российской Академии наук, Москва, Россия²Московский государственный университет, Москва, Россия

*e-mail: gillous@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 02.10.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

Морские проливы района Антарктического полуострова характеризуются интенсивными течениями, наличием морского льда и крупных айсбергов, сильными приливами, а также многими другими факторами, формирующими термохалинную структуру вод этого района и ее временную изменчивость. От термохалинных свойств вод в проливах зависит состояние местных экологических сообществ, что определяет актуальность настоящей работы. С этой точки зрения особенно выделяется пролив Антарктика, соединяющий пролив Брансфилда с западной частью моря Уэдделла. На основе новых натурных данных дано описание термохалинной структуры этого пролива. Впервые использованы уникальные данные, взятые с автономных датчиков, установленных на местных морских млекопитающих и позволившие проследить за изменениями вод в течение всего года. Определены переходные сезоны, а также общие границы значений термохалинных характеристик вод в проливе. Пространственная, сезонная и межгодовая изменчивость термохалинной структуры вод в проливе была исследована на основе данных за последние 40 лет.

Ключевые слова: термохалинная структура, пролив Антарктика, временная изменчивость, автономные измерения, датчики на морских млекопитающих

DOI: 10.31857/S0030157423040184, **EDN:** YAPMQL

ВВЕДЕНИЕ

Пролив Антарктика длиной около 55 км и шириной 20 км можно разделить на две части – северную мелководную с глубинами до 200 м и южную с глубинами до 1000 м (рис. 1). Воды пролива формируются в основном затоками из моря Уэдделла и – в меньшей степени – из пролива Брансфилда [25]. Верхний 200–400 м слой занимает Антарктическая поверхностная вода, смешанная с шельфовой водой [24]. Глубже располагаются воды преимущественно местного происхождения, образованные в ходе зимней конвекции [29]. Сезонное влияние оказывает таяние и образование льдов, как в самом проливе, так и на окружающих его территориях [7, 18].

Термохалинная структура и изменчивость вод пролива ранее практически не исследовалась: большую часть времени пролив заполнен льдом [13], и даже в летнее время количество натурных данных крайне мало. Современные научные работы [13, 27] рассматривают пролив Антарктика только с точки зрения соединения им моря Уэдделла и пролива Брансфилда и возможной циркуляции вод между ними. Даже в обзорных работах [9],

посвященных исследованию гидрофизических параметров в районе Антарктического полуострова, проливу Антарктика уделено недостаточно внимания по причине малого количества проведенных в проливе измерений. Одной из единичных современных работ по проливу является работа [16], в которой рассматривается динамика вод в данном районе. Необходимо также отметить, что соседний пролив Брансфилда очень активно исследуется в последние годы [8, 12, 15, 28], а новые работы по проливу Антарктика единичны и в основном затрагивают период лета Южного полушария. При этом данный район особенно подвержен климатическим изменениям [6], потенциально может давать вклад в водообмен между тихоокеанским и атлантическим секторами Южного океана, а также важен с точки зрения биопродуктивности в районе Антарктического полуострова [1, 4, 17, 22, 23, 30].

Для полноценного изучения термохалинной структуры пролива Антарктика необходимо большее количество STD-данных, получение которых связано с большими затратами судового времени. Однако современные измерения с использованием автономных датчиков, установленными на мор-

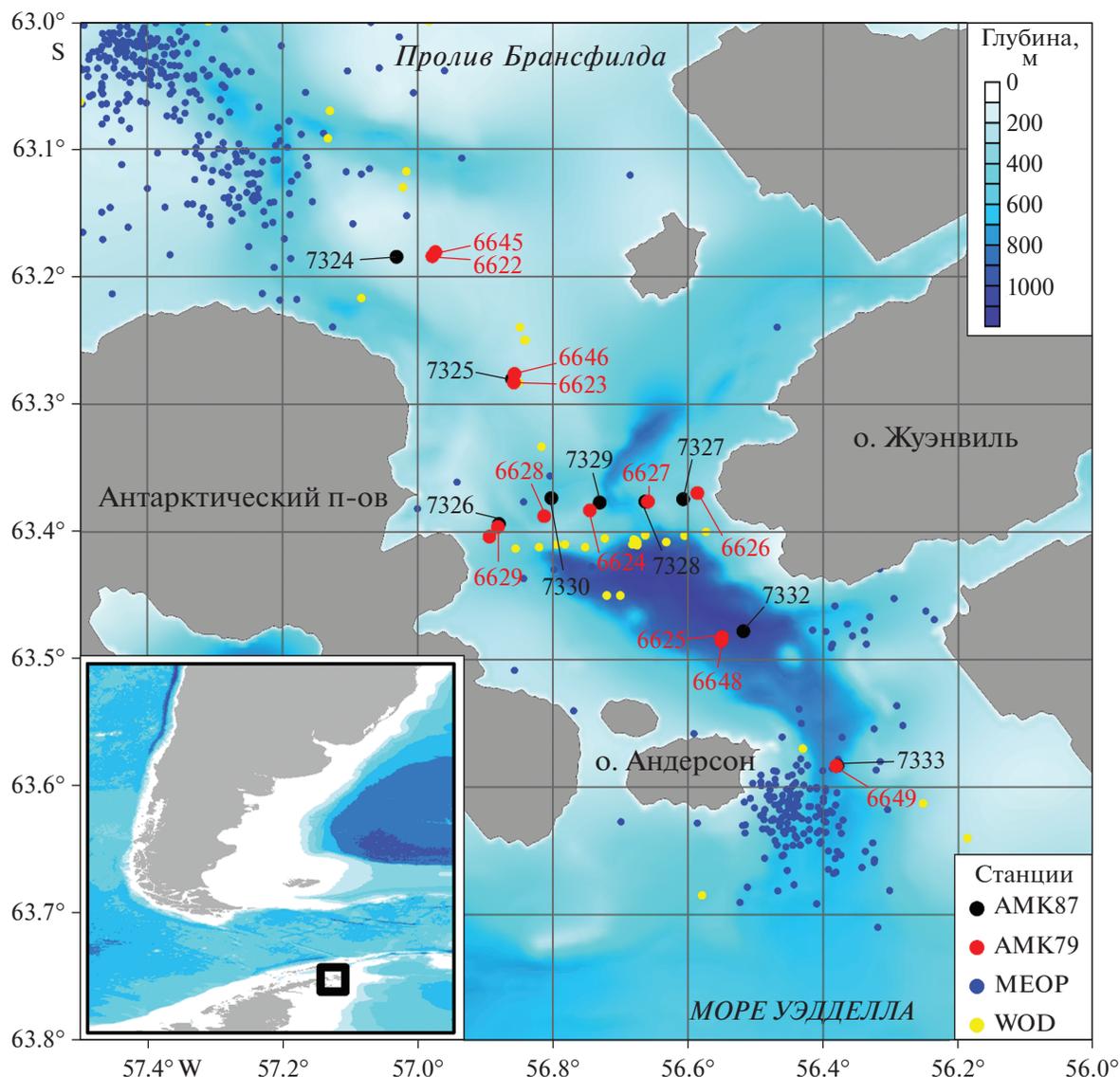


Рис. 1. Карта исследуемого района. Точками обозначены станции, на которых имеются профили потенциальной температуры и солёности воды: AMK87 (рейс 2022 г.) – черные точки, AMK79 (рейс 2020 г.) – красные точки, подписи соответствуют номерам станций; база данных MEOP – синие точки и база данных WOD – желтые точки. Рельеф дна показан в соответствии с базой данных GEBCO2021.

ских млекопитающих, помогают решить эту задачу. В настоящей работе эти измерения представлены базой MEOP (Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole) – международной программой [26], исследующей океан с помощью датчиков, установленных на морских животных. До настоящего времени ни в одной работе не были использованы данные полученные по программе MEOP в проливе Антарктика, хотя они уникальны в том числе благодаря зимним измерениям, что дает возможность проследить сезонную изменчивость термохалинной структуры вод пролива. Настоящая работа призвана проанализировать имеющиеся STD-данные из разных из раз-

ных источников, в том числе из базы данных WOD (World Ocean Database, 2018), и на их основании на их основании описать пространственно-временную изменчивость гидрофизических параметров вод пролива Антарктика.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовано максимально доступное количество измерений *in situ*, в том числе собственные полевые исследования, выполненные в 2020–2022 гг., данные с автономных датчиков, открытые данные из базы данных WOD.

Таблица 1. Номера, координаты, даты и глубины станций, выполненных в проливе Антарктика в ходе рейсов АМК79 и АМК87. Для удобства разбиты по разрезам, представленным ниже с повторением центральных точек. Положение станций приведено на рис. 1

Станция	Число месяц год время (UTC)	Координаты	Глубина зондирования, м/ Глубина океана
Продольный разрез 2020 г.			
6622	03.02.2020 02:28	63°11.04' S 56°58.69' W	128/136
6623	03.02.2020 04:36	63°16.96' S 56°51.49' W	197/201
6624	03.02.2020 06:22	63°22.97' S 56°44.74' W	301/310
6625	03.02.2020 07:53	63°28.91' S 56°33.11' W	948/959
Поперечный разрез 2020 г.			
6629	03.02.2020 13:36	63°23.77' S 56°52.91' W	284/290
6628	03.02.2020 12:45	63°23.26' S 56°48.81' W	516/525
6624	03.02.2020 06:22	63°22.97' S 56°44.74' W	301/310
6627	03.02.2020 10:51	63°22.58' S 56°39.82' W	394/397
6626	03.02.2020 10:15	63°22.19' S 56°35.16' W	286/296
Второй продольный разрез 2020 г.			
6645	13.02.2020 11:23	63°10.98' S 56°58.63' W	130/135
6646	13.02.2020 13:40	63°16.57' S 56°51.44' W	172/186
6647	13.02.2020 17:58	63°24.22' S 56°53.63' W	181/190
6648	13.02.2020 21:12	63°29.11' S 56°33.04' W	890/901
6649	14.02.2020 01:43	63°35.00' S 56°22.87' W	707/717
Продольный разрез 2022 г.			
7324	27.01.2022 16:57:00	63°11.06' S 57°01.88' W	102/109
7325	27.01.2022 18:45:00	63°16.85' S 56°51.57' W	189/198
7329	28.01.2022 00:37:00	63°22.68' S 56°43.88' W	294/305
7332	28.01.2022 11:08:00	63°28.64' S 56°31.18' W	998/1011
7333	28.01.2022 14:28:00	63°34.89' S 56°22.88' W	652/663
Поперечный разрез 2022 г.			
7326	27.01.2022 21:05:00	63°23.64' S 56°52.81' W	372/380
7330	28.01.2022 01:46:00	63°22.41' S 56°48.14' W	491/495
7329	28.01.2022 00:37:00	63°22.68' S 56°43.88' W	294/305
7328	27.01.2022 23:39:00	63°22.58' S 56°39.79' W	441/450
7327	27.01.2022 22:56:00	63°22.46' S 56°36.44' W	341/352

Собственные измерения

В ходе рейса АМК79 [19] в проливе было выполнено 13 станций, образующих три разреза — два продольных и один поперечный (табл. 1). Измерения проводились 3 и 13–14 февраля 2020 г. Работы велись с помощью зонда SBE 9plus опускаемого

на кабель-тресе и измеряющего вертикальное распределение температуры, электрической проводимости и прозрачности морской воды от поверхности до дна. Зондирующий комплекс укомплектован высокоточным температурно скомпенсированным датчиком давления (Digiquartz pressure sensor

410K), имеющим точность 0.015% на полный диапазон измерения (0–69 Мра), стабильность 0.018% в год от полной шкалы, постоянную времени 0.015 с., двумя дублирующими датчиками температуры (модели SBE 3plus), имеющими диапазон измерения от –5 до 35°C, первоначальную точность 0.001°C, среднюю стабильность 0.002°C/год, постоянную датчика по времени от 0.065 до 0.07 с, в зависимости от скорости погружения прибора, разрешение 0.0002°C, при частоте опроса 24 Гц. Два дублирующих датчика электропроводности (модели SBE 4C) конструктивно выполнены таким образом, чтобы работать синхронно в паре с температурными датчиками. Их основные характеристики – диапазон измерения от 0 до 7 сименс/м, первоначальная точность 0.0003 сименс/м, средняя стабильность 0.004 сименс/м год, разрешение 0.00004 сименс/м, постоянную датчика по времени 0.065 с.

В ходе рейса АМК87 [2, 3] в течение суток с 27 января по 28 января 2022 г. (табл. 1) в проливе Антарктика было выполнено 9 гидрофизических станций, образующих два разреза – продольный и поперечный. Работы велись с помощью зонда Idronaut OCEAN SEVEN 320Plus опускаемого на кабель-тросе и измеряющего вертикальное распределение температуры, электрической проводимости и прозрачности морской воды от поверхности до дна. Прибор представляет из себя особоточный зонд серии WOCЕ, снабженный парой совмещенных С/Т датчиков (электрод для измерения температуры и ячейка для измерения электропроводности, расположенные в одном корпусе). Для обеспечения постоянного потока воды через эти датчики на приборе установлена помпа SBE 5T. Зондирующий комплекс укомплектован высокоточным температурно скомпенсированным датчиком давления (РА-10Х), имеющим точность 0.01% и разрешение 0.002% на полный диапазон измерения (0–100 Мра), двумя дублирующими датчиками температуры, имеющими диапазон измерения от –5 до 45°C, первоначальную точность 0.001°C, разрешение 0.0001°C. Два дублирующих датчика электропроводности имеют диапазон измерения от 0 до 7 сименс/м, первоначальная точность 0.0001 сименс/м, разрешение 0.00001 сименс/м.

Данные автономных датчиков

Наибольшее количество данных в изучаемом районе представлено базой МЕОР. Датчики рассчитаны на глубины до 2000 м, имеют разрешение 0.005°C по температуре и 0.00004 сименс/м по электропроводности. Точность измерений составляет 0.02°C и 0.03 епс [26]. Измерение происходит при погружении животного на глубину больше 100 м, координаты погружения фиксируются при возвращении на поверхность,

что дает погрешность до нескольких километров относительно реального местоположения измерений, что объясняет расположение некоторых измерений на суше. Такая система дает возможность получить серию измерений в ограниченном районе за короткий период времени, а также проследить за перемещениями отдельного или нескольких животных. Малое количество литературных данных не дает возможность проверить точность полученных измерений для исследуемого района, однако согласно [21] для южного сектора Индийского океана данные МЕОР хорошо совпадают с данными судовых наблюдений.

Всего в данной работе было проанализировано 495 профилей, большинство из них приходится на март–август 2010 г., что дает возможность проследить за изменениями термохалинных характеристик вод в зимний период. Массив данных имеется и для 2014 г., но уже за летний период и преимущественно в южной части пролива. Многие профили располагаются на границе пролива Антарктика или даже за ней, но как будет показано далее их структура аналогична таковой в проливе, а большое количество измерений дает возможность проследить изменения на более продолжительном интервале времени. Распределение профилей по пространству и времени представлено на рис. 1 и 2.

Открытые данные CTD-измерений

Дополнительно использованы открытые данные судовых из базы данных WOD. Точность измерений находится в пределах 0.001–0.0058°C для температуры и 0.003–0.02 епс для солёности [5]. В базе данных WOD имеется 43 профиля в изучаемом районе, из них только 20 входят в полноценные разрезы – 10 в марте 1991 г. и 10 в феврале 1998 г. Распределение профилей по пространству и времени представлено на рис. 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой части настоящего раздела проанализированы последние результаты полевых работ, полученные в ходе двух рейсов 2020 и 2022 гг. для изучения в первую очередь пространственного распределения характеристик вод. Вторая часть посвящена данным программы МЕОР и сезонной изменчивости термохалинной структуры вод в проливе. Далее рассмотрены данные WOD совместно с остальными результатами, что позволило проследить многолетнюю изменчивость структуры вод региона.

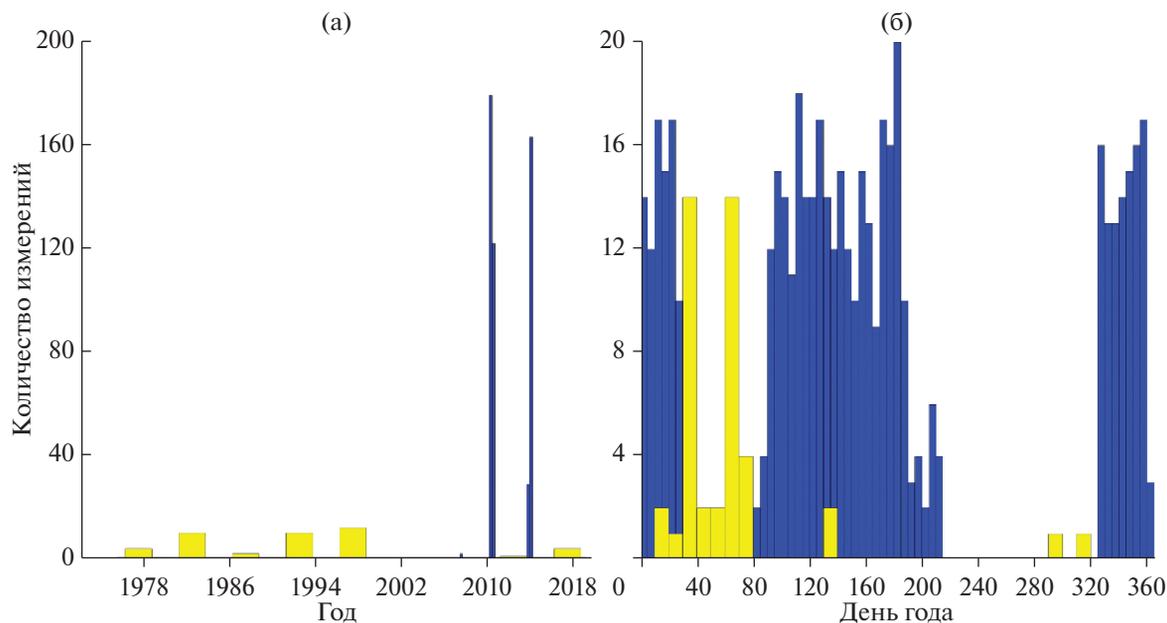


Рис. 2. Распределение профилей, содержащих значения температуры и солёности по времени: (а) по годам; (б) по времени года. Желтые бары показывают данные WOD, синие бары – данные MEOP. Зимние данные почти полностью представлены только автономными наблюдениями MEOP; многолетние тренды температуры и солёности наоборот, могут исследоваться только на основе CTD-данных WOD.

Пространственное распределение гидрофизических параметров в проливе

Продольный разрез 2022 г. (рис. 3в, 3г) характеризовался пониженными значениями солёности и потенциальной температуры в средней и – в большей степени – южной частях. Такое распределение отличалось от среднегодового баланса – как правило холодные и солёные воды моря Уэдделла находятся в глубоководной части пролива, а более теплые и пресные воды пролива Брансфилда – в мелководной части. Причина заключалась в активном таянии льда в южной части пролива Антарктика и прилежащем к нему районе моря Уэдделла. Наибольшее опреснение наблюдалось на крайней южной точке разреза: от 34.35–34.40 епс в верхнем слое до 34.50 епс на 150 м. Глубже изменение солёности незначительно, потенциальная температура плавно понижалась от -0.60 до -1.20°C .

Поперечный разрез 2022 г. (рис. 3а, 3б) выявил более сложную структуру вод в проливе. У обоих берегов пролива Антарктика в верхнем стометровом слое наблюдалась пониженная солёность и повышенная потенциальная температура. Также линза опресненных и прогретых вод присутствовала в верхних 20 м на всем разрезе. Исходя из структуры и направления течений [16] можно предположить распространение данных вод с прибрежной западной части пролива в центральную. При этом в восточной части слой теплых вод был мощнее, доходил до глубин 300 м, и не был

так сильно опреснен, что может быть связано с потоком из северо-западной части пролива. Распределение термохалинных характеристик глубже 300 м практически однородно, изменения в глубинных слоях от 300 м до дна составляли не более 0.40°C и 0.05 епс.

На продольном разрезе 2020 г. (рис. 4в, 4г) наблюдалась линза опресненных теплых вод, распространяющаяся вдоль всего пролива Антарктика. Наибольшее влияние талых вод отмечено в северной части: значения солёности и потенциальной температуры на станции 6623 достигали 34.11 епс и -0.14°C соответственно. Значительные градиенты потенциальной температуры и солёности (0.49°C и 0.16 епс на 100 м) прослеживались до дна в мелководной части пролива и до 250 м в глубоководной. Необходимо отметить станцию 6624, где в верхнем слое наблюдался подъем изохалин, что подтверждалось поперечным разрезом (рис. 4а, 4б). Здесь градиенты солёности и потенциальной температуры были незначительно больше – 0.54°C и 0.20 епс на 100 м соответственно. Опреснение более равномерно и максимально на самой восточной точке разреза, где солёность минимальна в поверхностном слое со значением 34.16 епс. Изотермы поверхностного слоя имели небольшой наклон в сторону станции 6626, что говорит о большем влиянии талых вод у восточного берега пролива.

Дополнительный продольный разрез (рис. 4д, 4е) в целом повторял структуру первого, но давал

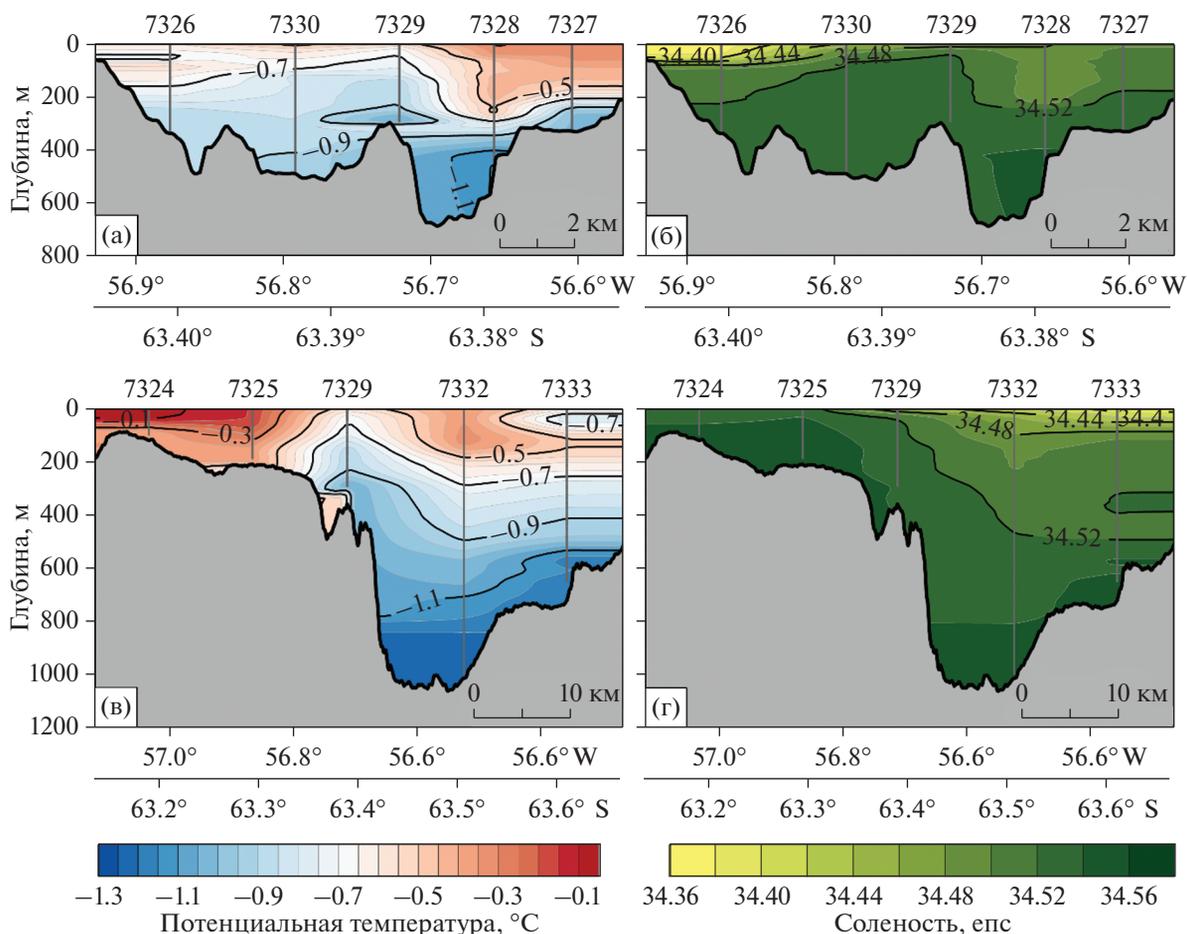


Рис. 3. Распределение потенциальной температуры (а, в) и солёности (б, г) на поперечном и продольном разрезах 2022 г. Номера станций указаны над рисунками, положения станций выделены серыми линиями. Шкалы потенциальной температуры и солёности одинаковы для обоих разрезов. Рельеф дна показан в соответствии с базой данных GEBCO2021.

больше информации благодаря станции 6649, которая располагалась на самом выходе из пролива Антарктика в море Уэдделла. На ней наблюдалось сильное поднятие изопикн относительно основной части пролива. Соответственно более плотные воды моря Уэдделла могут заполнять глубоководную часть пролива Антарктика, перетекая в слое 400–800 м.

Сезонная изменчивость гидрофизических параметров в проливе

Сезонная изменчивость термохалинной структуры вод в проливе исследовалась на примере 2010 и 2014 гг., поскольку именно в эти годы были получены подробные автономные измерения в рамках проекта MEOP. Осенне-зимний период 2010 г. (рис. 5а, 5б) характеризовался постепенным повышением солёности на 0.30 eps, с 34.30 eps в конце марта до 34.60 eps в августе. При этом за счет мелководности северной части пролива рас-

пределение по вертикали было практически однородно. Изменение потенциальной температуры наблюдалось только в начале осеннего периода, достигая значений около -1.86°C в поверхностном слое в конце апреля, после этого не менялось. Указанная потенциальная температура была близка к температуре замерзания морской воды, которая для солёности 34.50 eps и атмосферного давления составляет -1.87°C , согласно уравнению EOS80 [11]. Дальнейшее охлаждение идет на образование льдов, что и является основной причиной повышения солёности в течение зимнего периода.

В свою очередь в весенне-летний период 2014 г. (рис. 5в, 5г) солёность понизилась с 34.60 eps в конце ноября до 34.50 eps в начале февраля. Распределение по вертикали было неоднородно, присутствовали многочисленные интрузии талой воды, все более мощные в январе; опреснение верхнего слоя достигало 34 eps. Схожая картина наблюдалась и в распределении потенциальной

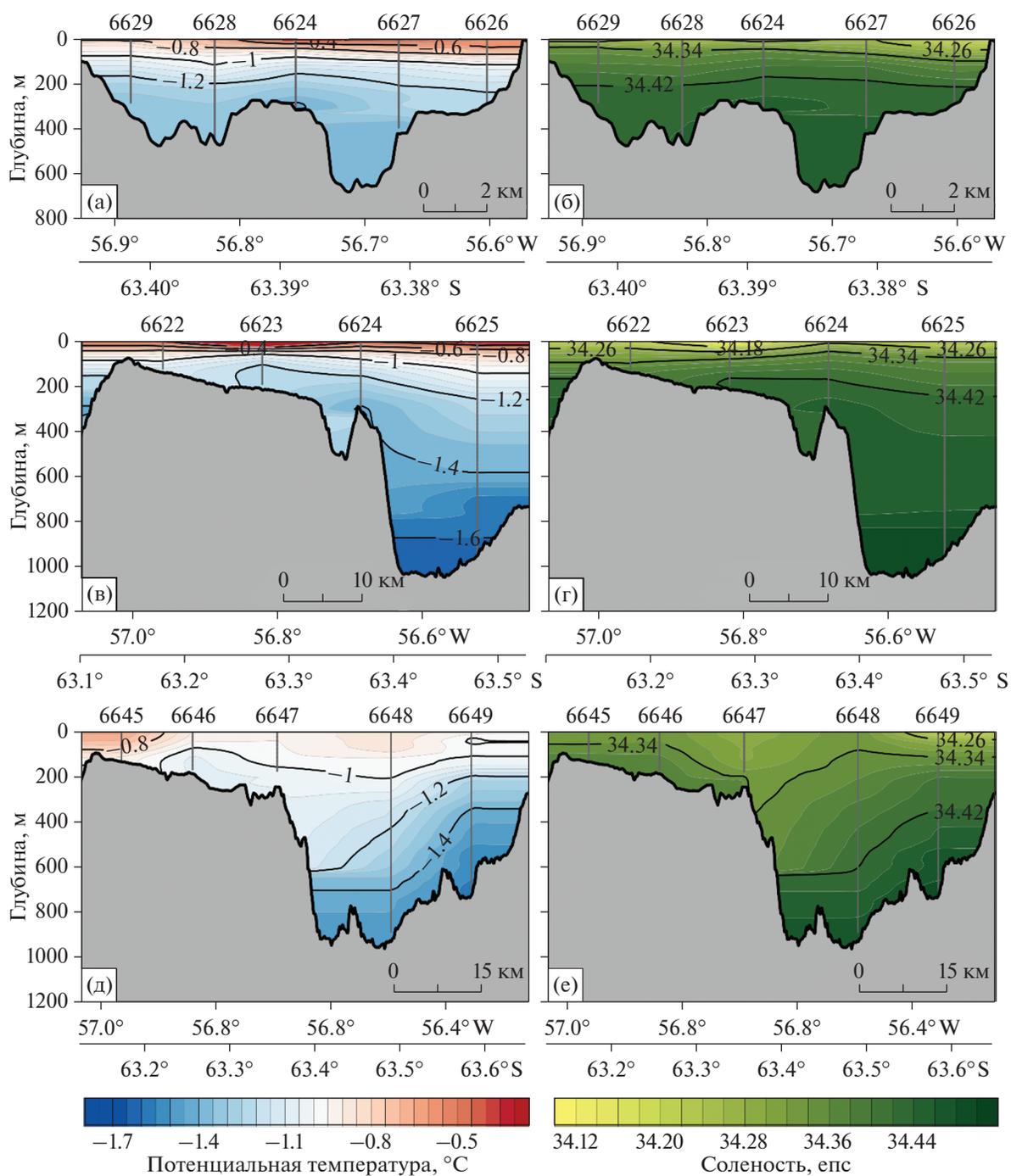


Рис. 4. Распределение потенциальной температуры (а, в, д) и солёности (б, г, е) на поперечном и двух продольных разрезах 2020 г. Первые два разреза выполнены в течение одних суток, последний на десять дней позже. Номера станций указаны над рисунками, положения станций выделены серыми линиями. Шкалы потенциальной температуры и солёности одинаковы для всех разрезов. Рельеф дна показан в соответствии с базой данных GEBCO2021.

температуры – многочисленные струи вод от поверхности до глубин 300 м со значениями от -1 до -1.40°C .

Также необходимо отметить важные моменты времени в годовом ходе потенциальной темпера-

туры θ и солёности S – период начала сильного охлаждения вод перед дальнейшим образованием льда и период летнего потепления и начала таяния льда. Для детального анализа построены θ, S -кривые по данным, полученным с датчика, установленного на одном животном, и дающее

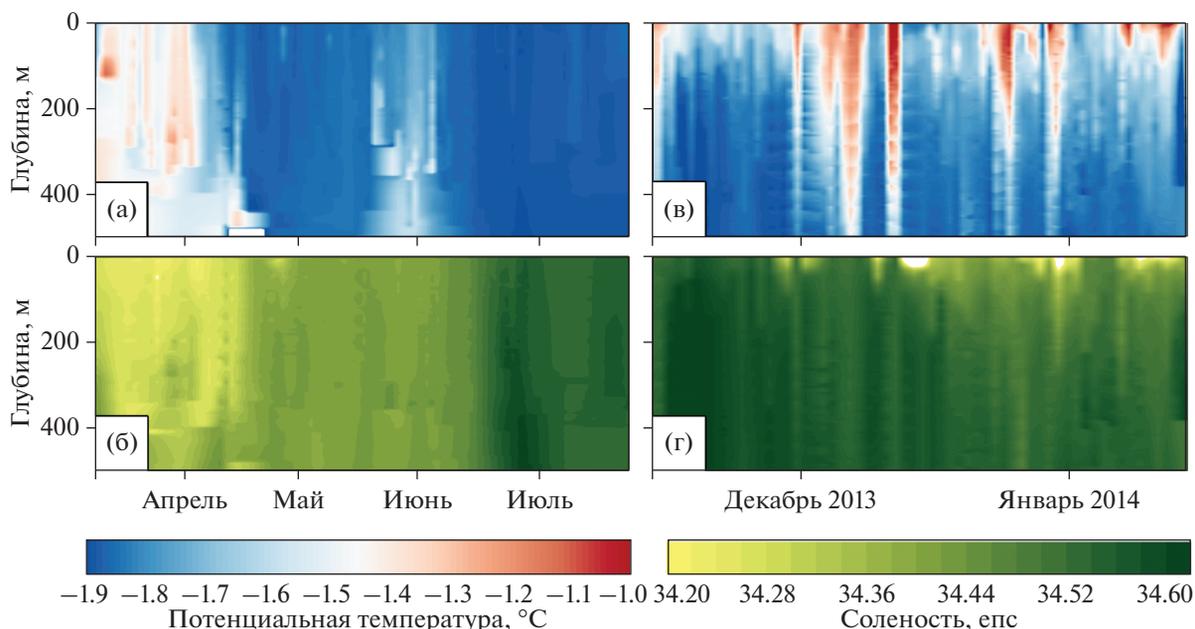


Рис. 5. Распределение потенциальной температуры и солёности в зимний период 2010 г. (а, б) и летний период 2014 г. (в, г). На временной шкале отмечены середины соответствующих месяцев. Шкалы потенциальной температуры и солёности одинаковы для обоих разрезов. Данные взяты из базы МЕОР, подробное пространственное и временное распределение станций показано на рис. 1, 2.

максимальное пространственное распределение по проливу за короткий промежуток времени. В апреле (рис. 6) верхний слой имел меньшую потенциальную температуру и солёность, при этом большинство профилей совпадали друг с другом. Прибрежные районы были больше подвержены влиянию охлаждения. Распределение термохалинных характеристик в декабре (рис. 6) в большей мере зависело от глубины: разница температур между верхним и нижним слоями достигала 1°C, изменения солёности были не так значительны по причине постепенного таяния льдов. Однако совпадение кривых в разных точках пролива отличное, отклонения потенциальной температуры и солёности не превышали 0.07°C и 0.03 епс и 0.24°C и 0.02 епс для апреля и декабря соответственно, что позволяет говорить об общей временной изменчивости структуры вод в переходные сезоны.

Многолетняя изменчивость гидрофизических параметров в проливе

На рис. 7 представлены θ, S -кривые всех имеющихся гидрофизических профилей в проливе Антарктика за летний период времени. Несмотря на большой разрыв между годами измерений и разными источниками данных, вода в проливе имела схожую структуру. Подавляющее большинство точек расположено вдоль условной прямой от -0.50°C , 34.30 епс к -1.50°C , 34.50 епс. Вертикаль-

ная стратификация вод определялась изменениями как температуры, так и солёности — поверхностный слой более тёплый и опреснённый, глубже потенциальная температура понижается, солё-

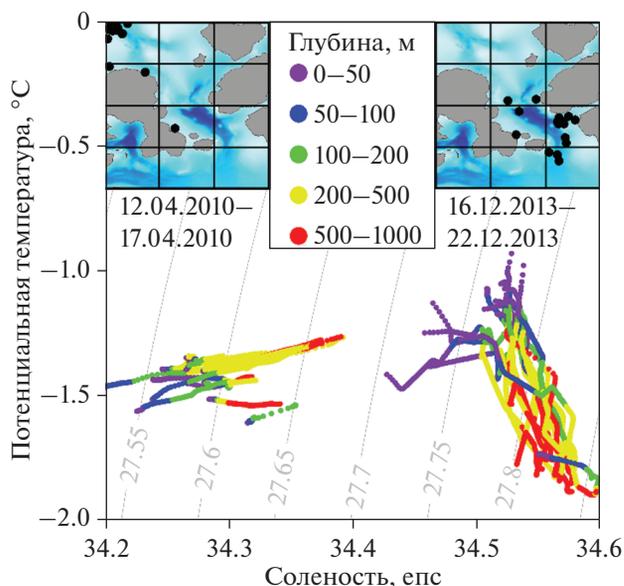


Рис. 6. θ, S -кривые за апрель 2010 г. (левая часть диаграммы) и декабрь 2013 г. (правая часть диаграммы). Расположения станций показаны на соответствующих мини-картах в верхней части рисунка черными точками. Серыми линиями обозначена потенциальная плотность на поверхности моря.

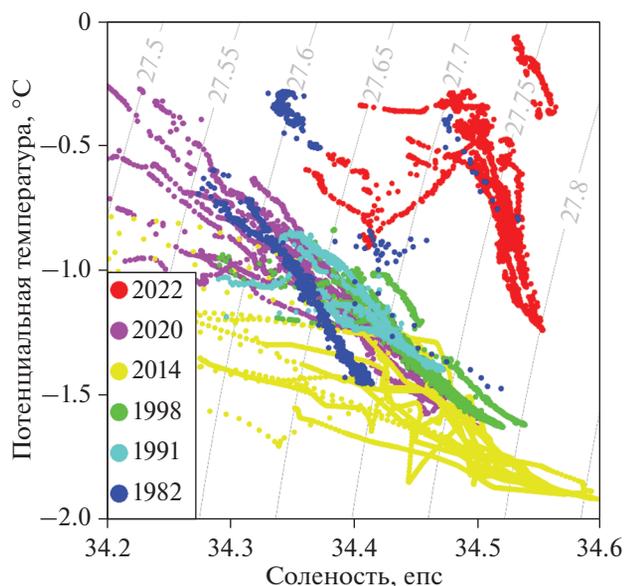


Рис. 7. θ , S -диаграмма за разные годы наблюдений в летний период времени в проливе Антарктика. Серыми линиями обозначена потенциальная плотность на поверхности моря.

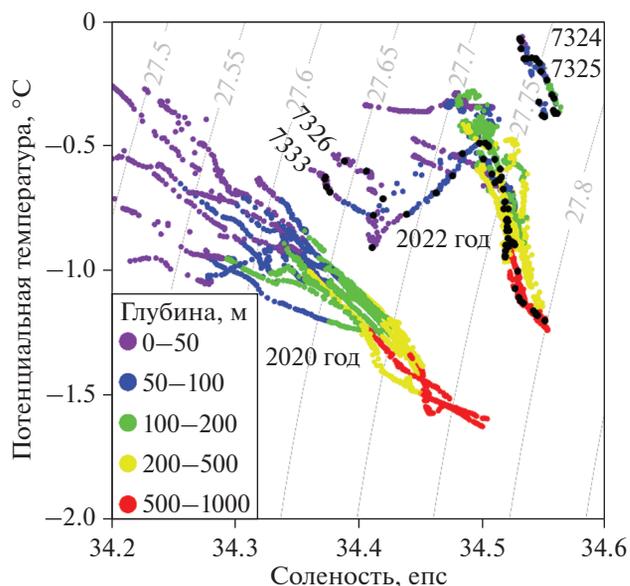


Рис. 8. θ , S -кривые за 2020 (нижняя левая часть диаграммы) и 2022 (верхняя правая часть диаграммы) годы наблюдений. Дополнительными черными точками выделены θ , S -кривые станций 7324, 7325, 7326 и 7333. Серыми линиями обозначена потенциальная плотность на поверхности моря.

ность растет. Необходимо отметить особенности структуры вод в 2014 г., когда наблюдалась пониженная температура со значениями ниже -1°C и повышенная соленность со значениями до 34.60 епс. Такое распределение связано как с аномально холодным летом, наблюдавшимся в районе Антарктического полуострова в 2014 г., что отмечено в [10], так и со сравнительно ранним (январь) периодом наблюдений. Также выделялся последний, 2022, год наблюдений (табл. 2). Здесь присутствовала уже отмеченная выше пространственная неоднородность – более соленая и теплая вода распределена по всей толще на северных точках, а на южных точках пролива находился

охлажденный опресненный верхний слой. Таким образом на части станций наблюдалась временная трехслойная структура вод с промежуточным теплым слоем. Но главная особенность заключалась в значительном потеплении и осолонении вод пролива Антарктика – за исключением верхнего 100-метрового слоя соленность менялась лишь в промежутке 34.50–34.55 епс, а минимальные значения потенциальной температуры не достигали даже -1.25°C . Однако необходимо отметить, что схожих аномалий в прилегающих районах (пролив Брансфилда и море Уэдделла) не наблюдалось.

Таблица 2. Значения гидрофизических параметров в разные годы в январе–марте. При расчетах исключены верхние 100 м в связи с их большой изменчивостью

Месяц, год	Температура минимальная	Температура средняя	Соленность максимальная	Соленность средняя	Плотность максимальная	Плотность средняя
02.1982	-1.47	-1.11	34.53	34.38	27.79	27.66
03.1991	-1.40	-1.23	34.47	34.42	27.75	27.70
02.1998	-1.63	-1.47	34.54	34.48	27.81	27.76
01.2014	-1.91	-1.76	34.60	34.51	27.86	27.79
02.2020	-1.62	-1.27	34.50	34.42	27.78	27.70
01.2022	-1.21	-0.82	34.56	34.53	27.81	27.77
Среднее за все года	—	-1.28	—	34.46	—	27.73

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура вод пролива Антарктика в летнее время определяется различными факторами: водообмен с морем Уэдделла и проливом Брансфилда, наличие и состояние льдов и айсбергов, внешние погодные условия. Все эти факторы влияют на гидрофизические параметры вод региона. Соответственно в разные годы могут наблюдаться различные вариации термохалинных характеристик. Диаграмма θ, S -кривых за 2020 г. (рис. 8) демонстрирует равномерное горизонтальное распределение потенциальной температуры и солёности по всему проливу с небольшими отклонениями в самой северной и южной частях. При этом наблюдается стратификация по всей глубине — изменение потенциальной температуры и солёности достигают 1.50°C и 0.40 епс соответственно. Структура вод в 2022 г. кардинально отличается. Сразу выделяются два профиля, полученных в северной части — практически одинаковая солёность около 34.55 епс и незначительно меняющаяся от -0.38 до -0.07°C потенциальная температура. Далее идет множество точек в средней части пролива со слабо опресненным и теплым верхним $100\text{--}150$ м слоем. И, наконец, профили самой южной и самой западной станций: верхний холодный и опресненный 50 м слой, резкое повышение потенциальной температуры и солёности в следующих 50 м и повторение структуры большинства точек разреза далее. Схожесть θ, S -кривых позволяет предположить общее происхождение вод в этих точках и, как следствие, перенос вод из моря Уэдделла вдоль юго-западного берега пролива Антарктика. Разница придонной и приповерхностной потенциальной температуры в феврале 2020 г. составляет 1.35°C ; аналогичное отличие в солёности составляет 0.31 епс. В январе 2022 г. эти отличия в термохалинных характеристиках придонных и приповерхностных вод в два раза меньше и составляют 0.75°C и 0.14 епс, что говорит о более однородной вертикальной структуре вод и более слабой вертикальной стратификации. Стоит отметить, что перемешивание вод может усиливаться за счет внутренних волн, интенсивность которых в районе Антарктического полуострова велика за счет сильных приливных течений [14].

Как было замечено выше, практически все профили за летний период показывают устойчивую стратификацию и линейную зависимость термохалинных характеристик от глубины. Различия в значениях потенциальной температуры и солёности поверхностного и придонного слоев в среднем составляют 1°C и 0.25 епс. При этом зависимость гидрофизических величин от расположения в разных частях пролива Антарктика может как наблюдаться (1982, 2022 гг.) так и отсутствовать (1991, 2014, 2020 гг.). В случаях наличия

пространственной изменчивости потенциальной температуры и солёности различия в значениях в поверхностном слое составляют: в 1982 г. 0.58°C и 0.17 епс, в 2022 г. 0.48°C и 0.15 епс, соответственно. В придонном слое различия в потенциальной температуре могут быть больше за счет разницы глубин, градиент солёности при этом незначителен. Существенные различия в термохалинной структуре вод пролива Антарктика в разные годы могут быть связаны с локальными погодными условиями — в случае резких метеорологических изменений структура вод во всем проливе становится более однородной (как мы видели из рис. 6); в случае же более стабильных погодных условий большее влияние на структуру вод оказывают факторы водообмена с проливом Брансфилда и морем Уэдделла, а также поведение айсбергов и ледовая обстановка.

За все годы наблюдений термохалинные параметры в проливе Антарктика менялись от года к году и от сезона к сезону, при этом оставаясь в следующих пределах: от -1.91 до -0.05°C , от 34.19 епс до 34.60 епс. Вариации температуры и солёности вод в проливе, вызванные сезонными колебаниями, наиболее значительны. Пространственная изменчивость температуры и солёности дает не такие существенные вариации этих параметров, что говорит. Межгодовая изменчивость термохалинных характеристик вод обычно незначительна. Вероятно, такая стабильность в значениях достигается в ходе зимней конвекции, которая происходит в самом проливе и сохраняет средние термохалинные характеристики в практически одинаковом диапазоне от года к году. При этом значительные отклонения от среднегодовых значений наблюдаемые в 2014 и 2022 гг. могут быть связаны с мощными затоками вод из соседних акваторий — пролива Брансфилда и моря Уэдделла, что подтверждается изменением термохалинных характеристик по всей глубине пролива Антарктика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основании всех имеющихся данных гидрофизических параметров в исследуемом регионе был проведен анализ термохалинной структуры и ее изменчивости и выделено несколько главных особенностей вод пролива Антарктика. Пространственное распределение гидрофизических параметров вод в проливе находится под влиянием затоков из пролива Брансфилда в северной части и вод моря Уэдделла в центральной и южной частях пролива Антарктика. Данные последних лет свидетельствуют о вероятном отсутствии или по крайней мере неостоянстве и незначительности водообмена моря Уэдделла с проливом Брансфилда через пролив Антарктика. Наши данные [16] показывают, что

сквозной поток через пролив Антарктика почти не наблюдается. Это подтверждает хорошо известный факт, что наблюдаемые в южной части пролива Брансфилда воды моря Уэдделла распространяются преимущественно вокруг острова Жуенвиль [13, 20]. Термохалинная структура вод, наблюдавшаяся в 2020 и 2022 гг., позволяет предположить наличие циклонического круговорота в южной и центральных частях пролива и невозможности вод моря Уэдделла преодолеть свал глубин в северной мелководной части.

Благодаря уникальным данным, полученным с датчиков на морских животных, изучена сезонная изменчивость структуры вод. Выявлены переходные весенние и осенние периоды – апрель и декабрь месяцы. Во время этих периодов наблюдается резкое синхронное изменение гидрофизических параметров по всему проливу Антарктика. Аналогичные изменения, хоть и меньшей амплитуды, периодически случаются и в летний период. При постепенном изменении внешних условий увеличивается влияние вод соседних акваторий, и распределение термохалинных характеристик вдоль пролива становится менее однородным.

Многолетние значения термохалинных характеристик довольно консервативны и за всю историю наблюдений практически не выходили за диапазон $-1.91-0^{\circ}\text{C}$, $34.20 \text{ епс}-34.60 \text{ епс}$. Редкие случаи присутствия вод с положительной потенциальной температурой или солоностью меньше 34.20 епс отмечены в основном в прибрежной зоне и связаны с локальным таянием льдов. Установленные пределы находятся в меньшем диапазоне, чем воды из соседних пролива Брансфилда и моря Уэдделла, в первую очередь по верхней границе солености. Таким образом даже при попадании вод из смежных бассейнов, в проливе Антарктика происходит их трансформация и перемешивание с местными водами, в основном шельфового происхождения, с последующим опреснением.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002 (сбор и обработка натуральных данных) и при поддержке гранта РФФ 22-77-10004 (анализ автономных измерений из базы данных МЕОР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин С.В., Минин К.В., Удалов А.А., Чикина М.В., Фрей Д.И., Молодцова Т.Н., Симаков М.И., Головань О.А., Сошина В.А., Неретин Н.Ю., Спиридонов В.А. Донные сообщества бассейна Пауэлла // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 2. С. 233–249.
2. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М., Фрей Д.И., Молодцова Т.Н., Кречик В.А., Латушкин А.А., Салюк П.А., Мурзина С.А., Минин К.В., Мишин А.В., Мошаров С.А., Селиверстова А.М., Борзых О.Г., Мельник А.В., Михайлов Д.Н., Чукмасов П.В., Замшин В.В., Битютский Д.Г. Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 5. С. 1–3. <https://doi.org/10.31857/S003015742205015X>
3. Морозов Е.Г. Краткие итоги антарктической экспедиции 2021–2022 гг. 87-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50. № 1. С. 126–128. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).12](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).12)
4. Спиридонов В.А., Залота А.К., Яковенко В.А., Горбатенко К.М. Состав популяции и транспорт молоди антарктического криля в районе бассейна Пауэлла (северо-западная часть моря Уэдделла) в январе 2020 г. // *Труды ВНИРО*. 2020. Т. 181. С. 33–51.
5. Boyer T.P., Baranova O.K., Coleman C., Garcia H.E., Grodsky A., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Paver C.R., Reagan J.R., Seidov D., Smolyar I.V., Weathers K.W., Zweng M.M. (2018). *World Ocean Database 2018*. A.V. Mishonov, Technical Editor. NOAA Atlas NESDIS 87.
6. Clarke A., Murphy E.J., Meredith M.P., King J.C., Peck L.S., Barnes D.K.A., Smith R.S. Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007. V. 362. №. 1477. P. 149–166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1958>
7. Collares L.L., Mata M.M., Kerr R., Arigony-Neto J., Barbat M.M. Iceberg drift and ocean circulation in the northwestern Weddell Sea, Antarctica // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. V. 149. P. 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.02.014>
8. Damini B.Yu., Kerr R., Dotto T.S. & Mata M.M. Long-term changes on the Bransfield Strait deep water masses: Variability, drivers and connections with the northwestern Weddell Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2022. V. 179. P. 103667. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103667>
9. Dorschel B., Gutt J., Huhn O., Bracher A., Huntemann M., Huneke W., Gebhardt C., Schröder M., Herr H. Environmental information for a marine ecosystem research approach for the northern Antarctic Peninsula (RV Polarstern expedition PS81, ANT-XXIX/3) // *Polar Biology*. 2016. V. 39. № 5. P. 765–787. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1861-2>
10. Dotto T.S., Kerr R., Mata M.M., & Garcia A.E. Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. V. 121. № 6. P. 3741–3756. <https://doi.org/10.1002/2015JC011228>
11. Fofonoff P., Millard R.C., Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, UNESCO Technical Papers in Marine Science Vol. 44 (1983) 53 pp.
12. Frey D., Krechik V., Morozov E., Drozd I., Gordey A., Latushkin A., Mekhova O., Mukhamejanov R., Murzina S., Ostroumova S., Ponomarev V., Salyuk P., Smirnova D., Shutov S., Zuev O. Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // *Water*, Manuscript Submitted
13. Huneke W.G., Huhn O., Schroeder M. Water masses in the Bransfield Strait and adjacent seas, austral summer

- 2013 // *Polar Biology*. 2016. V. 39. № 5. P. 789–798.
<https://doi.org/10.1007/s00300-016-1936-8>
14. *Khimchenko E.E., Frey D.I., Morozov E.G.* Tidal internal waves in the Bransfield Strait, Antarctica // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20. № 2. P. 2.
<https://doi.org/10.2205/2020ES000711>
 15. *Krechik V.A., Frey D.I., Morozov E.G.* Peculiarities of Water Circulation in the Central Part of the Bransfield Strait in January 2020 // *Doklady Earth Sciences*. Pleiades Publishing, 2021. V. 496. № 1. P. 92–95.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21010116>
 16. *Krek A.V., Krek E.V., Krechik V.A.* The Circulation and Mixing Zone in the Antarctic Sound in February 2020 // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean*. Springer, Cham, 2021. P. 83–99.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_6
 17. *Meyer B., Atkinson A., Bernard K.S., Brierley A.S., Driscoll R., Hill S.L. et al.* Successful ecosystem-based management of Antarctic krill should address uncertainties in krill recruitment, behaviour and ecological adaptation // *Communications Earth & Environment*. 2020. V. 1. № 1. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1038/s43247-020-00026-1>
 18. *Morozov E.G., Krechik V.A., Frey D.I., Zamshin V.V.* Currents in the western part of the Weddell Sea and drift of large iceberg A68A // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 5. P. 589–601.
<https://doi.org/10.1134/S000143702105009X>
 19. *Morozov E.G., Spiridonov V.A., Molodtsova T.N. et al.* Investigations of the ecosystem in the Atlantic sector of Antarctica (cruise 79 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) // *Oceanology*. 2020. V. 60. № 5. P. 721–723.
<https://doi.org/10.1134/S0001437020050161>
 20. *Polukhin A.A., Morozov E.G., Frey D.I., Artemiev V.A., Borisenko G.V., Seliverstova A.M., Chultsova A.L., Tishchenko P.P., Marina E.N., Popov O.S., Vidnichuk A.V., Medvedev E.V.* Water Structure in the Bransfield Strait (Antarctica) in January 2020: Hydrophysical, Optical, and Hydrochemical Features // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 5. P. 632–644.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021050106>
 21. *Roquet F., Williams G., Hindell M., Harcourt R., McMahon C., Guinet C., Charrassin J.-B., Reverdin G., Boehme L., Lovell P. & Fedak M.A.* Southern Indian Ocean database of hydrographic profiles obtained with instrumented elephant seals // *Scientific data*. 2014. V. 1. № 1. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1038/sdata.2014.28>
 22. *Siegel V., Reiss C.S., Dietrich K.S., Haraldsson M., Rohardt G.* Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) along the Antarctic Peninsula // *Deep sea research part I: oceanographic research papers*. 2013. V. 77. P. 63–74.
 23. *Spiridonov V. A.* Scenario of the Late-Pleistocene-Holocene Changes in the Distributional Range of Antarctic Krill (*Euphausia superba*) // *Marine Ecology*. 1996. V. 17. № 1–3. P. 519–541.
 24. *Thompson A.F., Heywood K.J.* Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2008. T. 55. № 10. C. 1229–1251.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.06.001>
 25. *Tokarczyk R.* Classification of water masses in the Bransfield Strait and southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis // *Polish Polar Research*. 1987. P. 333–366.
 26. *Treasure A.M., F. Roquet F., Ansoorge I.J., Bester M.N., Boehme L., Bornemann H., Charrassin J.-B., Chevallier D., Costa D.P., Fedak M.A., Guinet C., Hammill M.O., Harcourt R.G., Hindell M.A., Kovacs K.M., Lea M.-A., Lovell P., Lowther A.D., Lydersen C., McIntyre T., McMahon C.R., Muelbert M.M.C., Nicholls K., Picard B., Reverdin G., Trites A.W., Williams G.D., and de Bruyn P.J.N.* Marine mammals exploring the oceans pole to pole: a review of the MEOP consortium // *Oceanography*. 2017. V. 30. № 2. P. 132–138.
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2017.234>
 27. *van Caspel M., Hellmer H. H., Mata M. M.* On the ventilation of Bransfield Strait deep basins // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. V. 149. P. 25–30.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>
 28. *Veny M., Aguiar-González B., Marrero-Díaz Á., Rodríguez-Santana Á.* Seasonal circulation and volume transport of the Bransfield Current // *Progress in Oceanography*. 2022. V. 204. P. 102795.
<https://doi.org/10.1016/j.pocan.2022.102795>
 29. *Von Gyldenfeldt A.B., Fahrbach E., García M.A., Schröder M.* Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. V. 49. № 21. P. 4743–4766.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00157-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00157-1)
 30. *Wang Y. Z., Zhao Y.Q., Wang Y.M., Zhao W.H., Wang P., Chi C.F., Wang B.* Antioxidant peptides from Antarctic Krill (*Euphausia superba*) hydrolysate: Preparation, identification and cytoprotection on H₂O₂-induced oxidative stress // *Journal of Functional Foods*. 2021. V. 86. P. 104701.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104701>

Spatial and Temporal Variability of the Thermohaline Structure of Waters in the Antarctic Sound

O. A. Zuev^{a, #}, D. I. Frey^a, I. D. Drozd^{a, b}, V. A. Krechik^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: gillous@gmail.com*

The sea straits of the Antarctic Peninsula region are characterized by intense currents, the presence of sea ice and large icebergs, strong tides, and many other factors that form the thermohaline structure of the waters in

this region and its temporal variability. The existence of local ecological communities depends on the thermohaline properties of the waters in the straits that determines the relevance of this work. From this point of view, the Antarctic Sound, which connects the Bransfield Strait with the western part of the Weddell Sea, stands out in particular. Based on new field data, a description of the thermohaline structure of this strait is given. Unique data from autonomous sensors installed on marine mammals were used for the first time and made it possible to track changes in the waters throughout the year. The transitional seasons, as well as the general boundaries of the thermohaline characteristics of the waters in the strait, have been determined. The spatial, seasonal and interannual variability of the thermohaline structure of the waters in the strait was studied on the basis of data over the last 40 years.

Keywords: thermohaline structure, Antarctic Sound, temporal variability, autonomous measurements, sensors on marine mammals