Том 63, Номер 4

ISSN 0030-1574 Июль - Август 2023





СОДЕРЖАНИЕ

_

_

Том 63, номер 4, 2023

=

Предисловие

Комплексные исследования экосистем Атлантического сектора Южного океана	509
Физика моря	
Структура и временная изменчивость северной ветви Антарктического циркумполярного	
течения в проливе Дрейка	511
С. А. Остроумова, И. Д. Дрозо, Д. И. Фреи	511
Пространственная и временная изменчивость термохалинной структуры вод в проливе Антарктика	506
О. А. Зуев, Д. И. Фреи, И. Д. Дрозо, В. А. Кречик	526
Оценка климатического тренда гидрофизических характеристик бассейна Пауэлла А. А. Букатов, Н. М. Соловей, Е. А. Павленко	539
Гидрологическая структура и динамика вод в бассейне Пауэлла в январе-феврале 2022 <i>В 3. Мухамати ацов. 4. М. Сазиаератова, Е. Г. Морозов</i>	
Д. И. Фрей, В. А. Кречик, О. А. Зуев	548
Внутренние волны в районе острова Хаф-Мун, южные Шетландские острова	
О. С. Мехова, Д. А. Смирнова, Е. Г. Морозов, С. А. Остроумова, Д. И. Фрей	564
Структура придонных потоков в абиссальных каналах Атлантики: судовые и автономные наблюдения в канале Вима, разломе Романш и проходе Кейн	
О. С. Мехова, Д. А. Смирнова, Д. И. Фрей	576
Химия моря	
1 идролого-гидрохимическая структура вод пролива Брансфилда в январе 2022 г. <i>А.М. Селиеврстоед, О.А. Зуев, А.А. Полухин, А. Л. Чульноед</i>	
А. В. Масевич, Р. З. Мухаметьянов	590
Морская биология	
Первичная и бактериальная продукция в проливе Брансфилда (Антарктика) в летний период	
С. А. Мошаров, И. В. Мошарова, Д. И. Фрей, А. М. Селиверстова, А. А. Латушкин, С. В. Гонтарев	604
Концентрация и флуоресценция хлорофилла а в Атлантическом секторе Антарктики	
Н. А. Моисеева, Т. Я. Чурилова, Т. В. Ефимова, Е. Ю. Скороход, В. А. Артемьев, А. В. Юшманова	618
Региональный алгоритм расчета толщины фотического слоя из вертикального профиля показателя ослабления направленного света на примере северо-западной части моря Уэдделла	
А. А. Латушкин, П. А. Салюк, В. В. Суслин, О. В. Мартынов	628
Структура и пространственное распределение мезозоопланктонных сообществ в Атлантическом секторе Южного океана	
В. В. Касьян	634
Пространственная изменчивость макро- и мезозоопланктона в проливе Брансфилда в январе 2020 г.	
К. М. Горбатенко, В. А. Яковенко	643

Моделирование распределения и связи с абиотическими факторами среды молоди и половозрелого антарктического криля <i>Euphausia superba</i> на основании фактических гидрофизических измерений	
С. А. Мурзина, В. П. Воронин, Д. Г. Битютский, А. М. Орлов	6
Пространственная структура глубоководных пелагических ихтиоценов северной части моря Уэдделла (бассейн Пауэлла) и пролива Брансфилда в летний период 2020 и 2022 г. С. Г. Кобылянский, А. В. Мишин, А. М. Орлов, Н. В. Гордеева, Р. З. Мухаметьянов	(
Встречаемость и распределение финвалов (Balaenoptera physalus) и горбачей (Megaptera novaeangliae) в Атлантическом секторе Антарктики	
А. Д. Чернецкий, П. В. Чукмасов, В. В. Краснова, А. В. Третьяков, Л. Г. Третьякова, Д. Г. Битютский, С. А. Мошаров, П. А. Салюк	(
Численность массовых видов морских млекопитающих в окрестностях Антарктического полуострова, моря Скоша и бассейна Пауэлла	
С. П. Харитонов, А. В. Третьяков, П. В. Чукмасов, А. Д. Чернецкий, А. Л. Мищенко, Н. Б. Конюхов, А. Е. Дмитриев, С. М. Артемьева,	
Г. Ю. Пилипенко, М. С. Мамаев, Л. Г. Третьякова, В. В. Рожнов	

CONTENTS

_

Vol. 63, No. 4, 2023

Preface	509
Marine Physics	
Structure and Temporal Variability of the Northern Branch of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage	
S. A. Ostroumova, I. D. Drozd, D. I. Frey	511
Spatial and Temporal Variability of the Thermohaline Structure of Waters in the Antarctic Sound O. A. Zuev, D. I. Frey, I. D. Drozd, V. A. Krechik	526
Climate Trend Estimation of the Powell Basin Hydrophysical Characteristics A. A. Bukatov, N. M. Solovei, E. A. Pavlenko	539
 Hydrological Structure and Water Dynamics in the Powell Basin in January—February 2022 R. Z. Mukhametianov, A. M. Seliverstova, E. G. Morozov, D. I. Frey, V. A. Krechik, O. A. Zuev 	548
Internal Waves Near Half Moon Island, South Shetland Islands O. S. Mekhova, D. A. Smirnova, E. G. Morozov, S. A. Ostroumova, and D. I. Frey	564
Structure of Bottom Flows in Abyssal Channels of the Atlantic: Comparison of Autonomous and Vessel Observations in the Vema Channel, Romanche Fracture Zone, and Kane Gap	
O. S. Mekhova, D. A. Smirnova, D. I. Frey	576
Marine Chemistry	
The Hydrological and Hydrochemical Structure of the Waters of the Bransfield Strait	
A. M. Seliverstova, O. A. Zuev, A. A. Polukhin, A. L. Chultsova, A. V. Masevich, R. Z. Mukhametnyanov	590
Marine Biology	
Primary and Bacterial Production in the Bransfield Strait (Antarctica) in Summer S. A. Mosharov, I. V. Mosharova, D. I. Frey, A. M. Seliverstova, A. A. Latushkin, S. V. Gontarev	604
Concentration and Fluorescence of Chlorophyl a in the Atlantic Sector of Antarctic N. A. Moiseeva, T. Ya. Churilova, T. V. Efimova, E. Yu. Skorokhod, V. A. Artemiev, A. V. Iushmanova	618
A Regional Algorithm for Calculating the Photic Zone Thickness from the Vertical Profile of the Beam Attenuation Coefficient on the Example of the Northwestern Part of the Weddell Sea	
A. A. Latushkin, P. A. Salyuk, V. V. Suslin, O. V. Martynov	628
Structure and Spatial Distribution of Mesozooplankton Communities in the Atlantic Sector of the Southern Ocean V. V. Kasyan	634
Spatial Variability of Macro- and Mesozooplankton in the Bransfield Strait in January 2020 K. M. Gorbatenko, V. A. Yakovenko	643
Modeling of the Distribution and Relationship with Abiotic Environmental Factors of Juvenile and Adult Antarctic Krill <i>Euphausia superba</i> Based on Actual Hydrophysical Measurements	
S. A. Murzina, V. P. Voronin, D. G. Bitiutskii, A. M. Orlov	653

 Spatial Structure of Deep-Sea Pelagian Ichthiocenes in the Northern Weddell Sea (Powell Basin) and Brunsfield Strait in the Summer 2020 and 2022 S. G. Kobyliansky, A. V. Mishin, A. M. Orlov, N. V. Gordeeva, R. Z. Mukhametyanov 	660
Occurrence and Distribution of Fin Whales (<i>Balaenoptera physalus</i>) and Humpback Whales (<i>Megaptera novaeangliae</i>) in the Antarctic Atlantic Sector	
A. D. Chernetsky, P. V. Chukmasov, V. V. Krasnova, A. V. Tretiakov, L. G. Tretiakova, D. G. Bitiutskiy, S. A. Mosharov, P. A. Salyuk	677
Number of the Most Abundant Sea Mammal Species in the Vicinities of the Antarctic Peninsula, Scotia Sea and Powell Basin Area	
S. P. Kharitonov, A. V. Tretyakov, P. V. Chukmasov, A. D. Chernechky, A. L. Mischenko, N. B. Konyukhov, A. E. Dmitriev, S. M. Artemyeva, G. Yu. Pilipenko, M. S. Mamaev, L. G. Tretvakova, V. V. Rozhnov	689

УДК 551.465

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ АТЛАНТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА

DOI: 10.31857/S0030157423040123, EDN: XZZKTM

Антарктическая морская экосистема уникальна благодаря своей истории, насчитывающей миллионы лет, разнообразию составляющей ее биоты и высокой продуктивности. Основой этой экосистемы является антарктический криль. В ключевых районах Южного океана криль эффективно используется организмами высших трофических уровней экосистемы - морскими птицами, тюленями и китами. Одновременно криль является важным биологическим ресурсом для человечества, обладающим огромным промысловым потенциалом. Именно в Антарктике как районе международной юрисдикции были впервые отработаны эффективные механизмы охраны окружающей среды и использования ресурсов, реализованные в принятии Мадридского протокола Договора об Антарктике и Конвенции по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ). Россия играла важнейшую роль в становлении. научном обеспечении и реализации этих международных соглашений. В современной геополитической ситуации, регламентирующей преосторожное и бережное отношение к морским ресурсам, остро стоит задача развития вклада России в исследование и сохранение морских экосистем Антарктики, что позволит упрочить национальную позицию в Консультативном совещании Договора об Антарктике и АНТКОМ.

Основой функционирования антарктической морской экосистемы является Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), а также процессы в более высоких широтах вокруг антарктического континента, и в частности, круговорот Уэдделла. Роль абиотических и биотических компонентов этой экосистемы в формировании биологической продуктивности и поддержании популяции антарктического криля в настоящее время понятна далеко не полностью.

В последние десятилетия Южный океан испытывает значительные изменения, связанные с глобальными климатическими трендами, однако тенденции изменения циркуляции вод в разных секторах имеют разнонаправленный характер и их влияние на процессы в Мировом океане в целом и на функционирование антарктической экосистемы остаются недостаточно исследованными. В частности, отсутствует понимание того, как потепление на антарктическом континенте, более интенсивное таяние покровных льдов, увеличение количества плавающего льда и айсбергов и сопутствующая этим процессам отрицательная температурная аномалия влияет на функционирование антарктической экосистемы.

Настоящий номер журнала посвящен результатам комплексных исследований экосистемы атлантического сектора Антарктики в январефеврале 2020 г. и в январе-феврале 2022 г. на НИС "Академик Мстислав Келдыш" (79 и 87 рейсы) [1-4]. Были получены данные по структуре и циркуляции вод, оптическим свойств вод. гидрохимическим условиям, первичной продукции, зоопланктону, включая региональную специфику популяций криля и сальп, ихтиоценозам и популяциям морских млекопитающих. Исследованиями были охвачены область взаимодействия Антарктического циркумполярного течения с высокоширотными водами Антарктики, в частности водами круговорота моря Уэдделла. Эта область является наиболее высокопродуктивной зоной, где формируются высокие концентрации антарктического криля. Важнейшими районами исследования были пролив Брансфилда между Антарктическим полуостровом и Южными Шетландскими островами и бассейн Пауэлла к востоку от северной оконечности Антарктического полуострова. Район бассейна Пауэлла играет связующую роль между экосистемами крупномасштабного круговорота моря Уэдделла, моря Скотия и пролива Брансфилда, обеспечивая, в частности, накопление и перераспределение криля, поступающего с водами западной ветви круговорота Уэдделла. Исследован пролив Антарктик, соединяющий эти акватории богатые крилем и пищевым конкурентом криля – сальпами, которые увеличили численность в последние годы из-за безледных зим в проливе Брансфилда. Исследования проведены также в районе Южных Оркнейских островов к востоку от бассейна Пауэлла. Выполнены работы в районе бассейна Пауэлла к востоку от Антарктического полуострова, где воды круговорота Уэдделла взаимодействуют с водами Антарктического циркумполярного течения. В этом районе формируются условия для аккумуляции молоди криля, которая способна успешно перезимовывать за счет продукции ледовых водорослей. По пути движения в Антарктику исследова-



Рис. 1. Схема расположения станций в 79 и 87 рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш".

ны потоки Антарктической донной воды в абиссальных каналах Атлантики, поступающей из моря Уэдделла через Оркнейский проход до разлома Вима в северном полушарии.

Схема положения станций в экспедициях 2020 и 2022 гг. приведены на рис. 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А. и др. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019—март 2020 г.) // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1086–1088. https://doi.org/10.1134/S0001437019060134
- 2. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825. https://doi.org/10.31857/S0030157420050172
- 3. *Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др.* Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научноисследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш"). Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825– 827.

https://doi.org/10.31857/S003015742205015X

4. *Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A.* Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology // Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5 ———— ФИЗИКА МОРЯ ——

УЛК 551.465

СТРУКТУРА И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕВЕРНОЙ ВЕТВИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА

© 2023 г. С. А. Остроумова^{1, 2, *}, И. Д. Дрозд^{1, 3, 4}, Д. И. Фрей^{1, 5, 6}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

⁶Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*e-mail: ost.sophisticated@gmail.com

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.

После доработки 14.02.2023 г. Принята к публикации 27.03.2023 г.

Антарктическое циркумполярное течение играет ключевую роль в циркуляции Южного океана и влияет на перераспределение тепла океаном в глобальном масштабе. Изучение динамики и структуры этого течения становится особенно актуальным в условиях изменяющегося климата. Течение хорошо проявляется по данным спутниковой альтиметрии, что позволяет исследовать изменчивость его структуры во времени и пространстве на различных масштабах. В этих задачах на первый план выходит методика определения положения отдельных фронтов Антарктического циркумполярного течения на основе данных спутниковой альтиметрии. В данной работе мы сравниваем различные подходы к выделению фронтов. Для этого на основе данных спутниковой альтиметрии с 1993 по 2020 гг. и результатов гидрофизического разреза, выполненного на НИС "Академик Мстислав Келдыш" через северную часть пролива Дрейка в феврале 2020 г., рассмотрена структура самой северной ветви Антарктического циркумполярного течения – Субантарктического фронта и его пространственно-временная изменчивость. Для оценки динамики фронта выбран участок трека спутниковых альтиметров TOPEX/Poseidon, Jason-1,2,3 от острова Огненная Земля на юг длиной в 350 км. Представлены критерии для определения положения северной и главной ветвей Субантарктического фронта на базе данных спутниковой альтиметрии. Обнаружен многолетний тренд смещения положения фронтов относительно ранее принятых уровней абсолютной динамической топографии. Установлено, что точность определения положения фронтов по фиксированным значениям динамической топографии со временем может снижаться, в частности, из-за изменения среднего уровня моря. Обнаружен статистически значимый многолетний тренд повышения уровня моря в районе Субантарктического фронта со скоростью 4 мм/год для северной ветви и 2.5 мм/год для основной.

Ключевые слова: Субантарктический фронт, Антарктическое циркумполярное течение, спутниковая альтиметрия, струи, пролив Дрейка DOI: 10.31857/S0030157423040160, EDN: YLOMSW

1. ВВЕДЕНИЕ

Между Антарктическим полуостровом и Огненной Землей в проливе Дрейка проходит Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), являюшееся самым мошным течением в Мировом океане и характеризующееся сильными градиентами плотности, температуры и солености [1, 13, 32, 34, 35, 40]. На основе гидрологических измерений ранее была предложена классическая классификация фронтов АЦТ. Согласно этой классификации, в АЦТ выделяют три основных фронта: Субантарктический фронт (САФ), Полярный фронт, Южный фронт АЦТ, а также Южную границу АЦТ [35]. Основываясь на данных спутниковой альтиметрии, результатах натурных измерений и данных буйковых станций Argo, Coколов и Ринтул [42, 43] описали разделение АЦТ на девять струй: у Субантарктического течения и Южного Полярного течения было выделено по три струи, у Южного антарктического течения – две, и течение Южной границы АЦТ рассматривалось как самостоятельная ветвь. В работах [4–7] проанализированы гидрофизические разрезы к югу от Африки и долговременный ряд карт абсолютной динамической топографии (АДТ), выявлено 12 струй АЦТ. Многоструйная структура АЦТ хорошо просматривается в регионах с широкими глубоководными котловинами. В проливе Дрейка струи сливаются, образуя несколько более сильных струй [41].

Согласно классификации фронтов, представленной в работе [10], САФ разделяется на главную (САФ-гл) и северную (САФ-с) ветви. В этой же работе было предложено определять положение фронтов по фиксированным значениям изолиний АДТ 23 см (САФ-с) и –10 см (САФ-гл). САФ-с, подходя к южной оконечности Южной Америки, прижимается к шельфу у Огненной Земли, далее следует по изобате 300 м на северо-восток, распространяется между банкой Бердвуд и Фолклендскими/Мальвинскими островами и далее следует на север. прижимаясь к континентальному склону Южной Америки. Стоит отметить, что вариативность положения САФ сильно зависит от направления, наклона и ширины континентального склона, согласно исследованию на основе натурных измерений и спутниковых наблюдений в районе Патагонского шельфа [22]. Ширина северной ветви течения в среднем составляет 10-20 км, максимальные скорости могут достигать 40-50 см/с [7, 9, 21, 33]. Течение, наблюдаемое вдоль главной ветви САФ, составляет 150 км по ширине. Фронт имеет большую амплитуду смещения по пространству. Наибольшие скорости течения у поверхности могут достигать 75 см/с [7, 21], а на глубине 1000 м – 30 см/с [19]. Исследование ветвей САФ-с и САФ-гл в этом месте представляет особый интерес, поскольку соответствующие течения переносят антарктические воды далеко на север вдоль континентального склона. Взаимодействие этих вод с теплыми водами Бразильского течения приводит к активной генерации вихрей, что во многом определяет биологические процессы в обширном регионе Юго-Западной Атлантики [3, 23, 30]. Кроме этого, взаимодействие САФ-с с континентальным склоном Южной Америки определяет структуру апвеллинга на шельфе Патагонии [28, 37].

Спутниковые наблюдения особенно важны для исследования Южного океана, поскольку постоянные судовые наблюдения в этом регионе остаются крайне редкими. АЦТ хорошо проявляется на спутниковой альтиметрии по данным АДТ поверхности океана. Положения фронтов АЦТ можно определить как по данным измерений вдоль треков спутников, так и по интерполированным на регулярную сетку данным. Альтиметрия показывает, что географическое распределение течений и их изменчивость сильно зависят от рельефа дна [12, 22]. Авторы работ [27, 42] изучили структуру АЦТ в проливе Дрейка, используя альтиметрические данные и гидрофизические измерения, что позволило обнаружить связь между сильными течениями и максимумами градиента АДТ. Необходимо отметить, что определение положения ветвей течений с помощью спутниковой альтиметрии содержит определенные неточности, поскольку ширина фронтов мала по сравнению с пространственным разрешением спутниковых альтиметров [20], а быстрое изменение положения фронтов не всегда можно отследить из-за недостаточного разрешения по времени. Как правило, подобные массивы данных сглаживают положение фронта, особенно с увеличением осреднения по времени [4], и могут уменьшать предполагаемую скорость течения.

Определение фронтов по фиксированным изолиниям уровня моря является темой для дискуссий, особенно в региональных исследованиях. Локальные изменения уровня моря и повышение температуры океана требуют особого внимания при определении положения фронтов по фиксированным изолиниям температуры или АДТ. Исследование смещения АЦТ к югу от Африки на основе альтиметрических данных за 26 лет показало в среднем сдвиг поля сильных градиентов всех ветвей АШТ на 0.05° широты в северном направлении, однако отдельно отмечается сдвиг САФ к югу [44]. Смещение главных ветвей АЦТ ранее исследовалось в работах [25, 26] на основе альтиметрии на регулярной сетке с использованием массива данных с 1993 по 2012 гг. Поскольку уровень моря непрерывно растет, важным моментом является постоянное отслеживание актуальной обстановки. Спутниковая альтиметрия на регулярной сетке имеет разрешение 0.25° по широте и долготе, что может являться недостаточным для исследования тонкой структуры и изменчивости ветвей АЦТ. Кроме этого, фильтрация массива ланных может уменьшать точность ланных в прибрежной зоне. Вдольтрековая альтиметрия позволяет точнее идентифицировать положение фронтов и отследить изменчивость их положения во времени.

В данной работе рассматривается структура фронтов САФ-с и САФ-гл в районе пролива Дрейка и их пространственно-временная изменчивость по данным аномалий уровня моря и АДТ на основе вдольтрековой спутниковой альтиметрии. Для анализа вертикальной термохалинной структуры САФ-с были использованы результаты СТD-зондирования поперек материкового склона. Вертикальная кинематическая структура САФ-с и САФ-гл исследовалась по данным бортового профилографа скорости течений. В работе также определены критерии среднего положения ветвей САФ-с и САФ-гл на основе современных данных альтиметрии и долговременные тренды смещения этих фронтов в пространстве.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследование структуры и изменчивости САФ выполнено на основе натурных и спутниковых данных. Подробное описание натурных данных приведено в разделе 2.1; описание спутниковой альтиметрии представлено в разделе 2.2; в разделе 2.3 описан метод определения фронтов по данным вдольтрековой альтиметрии.

2.1. Судовые измерения

Натурные данные получены в 79-ом рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН 6 февраля 2020 года [31]. В ходе рейса выполнен разрез бортовым акустическим доплеровским профилографом скорости течений (SADCP, Shipborne Acoustic Doppler Current Profiler) попутно с юго-востока на северо-запад к острову Огненная Земля через САФ-с и САФ-гл для получения данных о скоростях течений в верхнем слое до глубины 800 м. Кроме этого, через САФ-с выполнено 11 станций с зондированиями розеттой SBE 32 (Carousel Water Sampler), оснащенной CTD-зондом SBE 19plus SEACAT фирмы SeaBird. Расстояние между станциями варьировалось между 5.6 и 12 км. Описание гидрологического разреза приведено в работе [29].

СТD-зонд непрерывно сканирует водную толщу с частотой 4 Гц. Профилирование проводилось со средней скоростью 1 м/с, что дает приблизительно четыре измерения на метр. Данные обработаны в программе SBE Data Processing версии 7.26.7.129 по стандартному протоколу, осреднены и интерполированы с шагом в 1 м.

Распределения скоростей течений в верхнем слое океана (до 800 м) по ходу движения судна определялись с помощью установленного на судне SADCP Ocean Surveyor фирмы TRDI с частотой 76.8 кГц. Вертикальное разрешение получаемого профиля скорости составляет 8 м; скорости течений измеряются в 100 точках (ячейках) по вертикали. Осадка судна составляет 6 м, слепая зона (параметр Blank Distance) – 8 м, что дает 18 м от поверхности до центра первой ячейки данных. Для регистрации данных, оперативного контроля и последующего анализа использовались программы VmDas версии 1.46 и WinADCP версии 1.14. Сырые данные измерений осреднялись по времени с шагом 2 минуты. Скорость судна составляла от 8 до 10 узлов, что соответствует горизонтальному разрешению около 500 м. При обработке данных бортового профилографа скорости вычтены приливные компоненты скорости по модельным данным ТРХО9 [15]. Отфильтрованы данные в придонном слое толщиной в 15% глубины в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна.

2.2. Спутниковая альтиметрия

Вдольтрековые спутниковые данные взяты с pecypca Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, http://marine.copernicus.eu/, дата обращения 29.11.2021) из массива данных SEALEVEL GLO PHY L3 MY 008 062 (уровень обработки L3), содержащего данные аномалий уровня моря и значения средней динамической топографии вдоль подспутниковых треков отдельных альтиметров. Альтиметрическую информацию для данного массива в настоящий момент предоставляет миссия спутника Jason-3, которая имеет постоянную орбиту, повторяющую один и тот же трек с периодом в 9 дней 21 ч 58 мин. Пространственный шаг между точками измерений составляет 6.2 км вдоль трека; расстояние между подспутниковыми треками в исследуемом районе -155 км. Данный спутник выполняет миссию с 26.05.2016 по настоящее время. Ранее на этих же треках работали Topex/Poseidon (1993-2002), Jason-1 (2002-2008) и Jason-2 (2008-2016). Общее время вдольтрековых наблюдений на постоянных орбитах с 1 января 1993 года составляет 28 лет. Для анализа временной изменчивости САФ выбран трек № 28, ближайший к разрезу с натурными измерениями, ориентированный практически параллельно треку судна и находящийся на расстоянии около 45 км от разреза.

Для оценки пространственного распределения градиентов АДТ мы использовали массив данных SEALEVEL GLO PHY L4 MY 008 047, представленный на регулярной сетке с пространственным разрешением в 0.25° по широте и долготе, шагом по времени в одни сутки с первого января 1993 года. Этот массив данных включает измерения со всех доступных альтиметров, интерполированных по времени и пространству на регулярную сетку. Недостатком таких данных является сглаживание градиентов уровня моря на фронтах и соответствующее уменьшение геострофических скоростей течений. Несмотря на это, использование альтиметрии с регулярным разрешением помогает оценить пространственную структуру фронтов и вихрей с постоянным шагом по времени [7, 17, 18, 20, 21].

2.3. Критерий определения САФ по вдольтрековой альтиметрии

В настоящее время существует несколько критериев для определения фронтальных зон и струй АЦТ на основе спутниковой альтиметрии. Для САФ-с авторы работы [10] предлагают использовать изолинию АДТ 23 см, в работе [2] с этой целью использовали изолинию 25 см. Главную ветвь в работе [10] определяли по изолинии –10 см, в работе [2] – по 0 см. Чурин [8] выделяет САФ по фиксированной изолинии АДТ, равной 12 см, в



Рис. 1. Рельеф дна в северной части пролива по данным GEBCO, 2021 [24]. Станции гидрофизического разреза 6 февраля 2020 г. показаны красными точками, маршрут НИС "*Академик Мстислав Келдыш*" во время попутных измерений скоростей течений бортовым профилографом скорости – красной линией. Черной сплошной линией отмечен подспутниковый трек № 28 Topex/Poseidon (1993–2002), Jason-1 (2002–2008), Jason-2 (2008–2016), Jason-3 (с 2016 по настоящее время). Черными штриховыми линиями показано положение САФ-с и САФ-гл по данным средней динамической топографии согласно [10].

работе [45] использовали для этого изолинию 12.2 см. Кроме этого, в данной работе использовался критерий определения положения фронта по максимуму градиента уровня. Для этого проводилась предварительная обработка вдольтрековых данных альтиметрии, которая подробно описана ниже.

Процесс обработки вдольтрековых альтиметрических измерений до уровня L3 включает фильтрацию данных [14], поэтому некоторые треки содержат неполный набор точек измерений. Часто отсутствуют результаты измерений в шельфовой зоне, над глубинами менее 200 м. Поскольку пространственный шаг вдоль трека составляет 6.2 км, а ширина САФ-с в среднем равна 10-20 км [21, 29], было важно оставить для дальнейшего анализа наиболее полные треки. В связи с этим для анализа не использовались треки, содержащие пропуски в двух и более точках подряд. Кроме этого, были выбраны треки, заполненные на 90% и с имеющимися непрерывными измерениями над континентальным склоном. По итогам очистки данных от неполных треков для подробного анализа осталось 780 из 942 пролетов спутников за промежуток времени с 10.02.1993 по 03.06.2020.

Спутники радиовысотных измерений получают альтиметрические данные о мгновенной аномалии уровня океана относительно средней по времени динамической топографии поверхности океана. Так как аномалии уровня не определяют скорость геострофических течений, на первом шаге необходимо рассчитать значения АДТ вдоль интересующего трека. Для этого производится сложение аномалий уровня моря со средней динамической топографией, взятой из массива вдольтрековой альтиметрии. В проливе Дрейка наблюдается понижение уровня АДТ с повышением широты. Места наиболее резкого наклона морской поверхности соответствуют высоким скоростям геострофических течений, поэтому для определения фронта мы рассматривали только локальные отрицательные максимумы градиента (положительные значения градиента соответствуют увеличению уровня с увеличением модуля широты), превышающие 25 мм/км, согласно [42]. САФ-с следует изобате 300 м вдоль континентального шельфа и редко отходит от него дальше изобаты 3500 м [36, 39]. Исходя из этого, мы определяли САФ-с только в случаях, когда максимум градиента находился между указанными глубинами. Проявление следующего сильного градиента после изобаты 3500 м указывало на положение САФ-гл.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственная структура фронтов в северной части пролива Дрейка была исследована на



Рис. 2. Распределение потенциальной температуры (а) и солености (б) на разрезе через САФ-с, выполненный 06.02.2020. Изолинии потенциальной плотности показаны штриховыми линиями. Вертикальными линиями отмечено положение CTD-станций; номера станций указаны вдоль верхней оси. Зеленой полосой показано положение САФ-с, соответствующее максимуму градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020 в соответствии с критерием [10]. Большинство станций выполнялось до глубины 500 м; станции 6639–6642 на глубине, меньшей 500 м, выполнялись до дна; измерения на станции 6632 были проведены до глубины 832 м.

основе натурных данных, в то время как временная изменчивость положения фронтов САФ-с и САФ-гл анализировалась на основе данных спутниковой альтиметрии. В разделе 3.1. рассмотрено распределение температуры, солености и скоростей течений по результатам натурных измерений. Результаты определения положения фронта по максимуму градиента уровня представлены в разделе 3.2. Многолетние и сезонные смещения ветвей САФ рассмотрены в разделе 3.3.

3.1. Вертикальная структура САФ

Разрезы температуры и солености приведены на рис. 2a, 2б. Наблюдается сильный наклон изотерм и изохалин к материковому склону; верхний слой океана в зоне над континентальным склоном характеризуется более слабой вертикальной стратификацией, чем в открытой части океана. Верхний перемешанный слой на станциях 6632-6636 составляет 50 м, увеличиваясь по мере приближения к шельфу. На станции 6640 по данным судового профилографа скорости отмечено ядро течения, также в этом месте наблюдается слабый вертикальный градиент температуры. На горизонте 100 м температура составляет 6.9°С, на горизонте 200 м – 6.3°С (средний вертикальный градиент в этом слое равен 0.006°С/м). Вне течения, на станции 6632. градиент более сильный. С 50 до 100 м температура падает на 2°С, что соответствует вертикальному градиенту 0.04°С/м. Разрез солености показывает аналогичное распределение вертикальных градиентов. В верхнем перемешанном слое соленость составляет менее 34 psu,



Рис. 3. Результаты натурных измерений скоростей течений с помощью SADCP в северной части пролива Дрейка. (а) Скорости течений, измеренные бортовым профилографом скорости, в осредненном верхнем 50-метровом слое. (б) Распределение скоростей течения вдоль изобаты 300 м (направление 47°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены северо-восток. (в) Распределение скоростей течения поперек изобаты 300 м (направление 317°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены секорости показаны красным цветом, направлены скорости показаны красным цветом, поперек изобаты 300 м (направление 317°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены е корости показаны красным цветом, направлены в 15% глубины исключены из рассмотрения в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна. Штриховыми линиями отмечены положения фонтов по АДТ 23 и -10 см, согласно [10]; сплошными линиями отмечены положения максимумов градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020. Рельеф дна взят из базы данных GEBCO, 2021 [24].

в глубоководной части разреза наблюдаются более соленые воды – до 34.2 psu.

По результатам попутных измерений бортовым профилографом скорости течений, наблюдаются две струи САФ (рис. 3б). САФ-с следует изобате 300 м, которая в точках измерений направлена на 47° (на северо-восток), что также просматривается по данным АДТ на регулярной сетке и на разрезах SADCP. Осредненные в верхнем 50-метровом слое скорости подтверждают,

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

что САФ-с прижат к 300-метровой изобате (рис. 3а) и их направления совпадают. Исходя из этого, для анализа структуры САФ построено распределение компоненты скорости перпендикулярно разрезу в направлении 47°. Максимальные скорости САФ-с достигают 50 см/с и наблюдаются на горизонте 100 м над изобатой 300 м. Ширина ветви у поверхности со скоростями больше 30 см/с составляет 15-20 км. САФ-гл находится на расстоянии около 280 км от изобаты 300 м. Максимальное значение скорости течения составляет 59 см/с и наблюдается на глубине 130 м. Главная ветвь проникает на глубину более 800 м; скорости на этом горизонте составляют от 35 до 40 см/с. Также построено распределение скоростей течения перпендикулярно изобате 300 м (вдоль разреза) в направлении 317°. Поперек склона скорости течения САФ-с не превышают 10 см/с, а скорости САФ-гл могут быть больше 50 см/с. Исходя из этого, можно сделать вывод, что прибрежная струя прижата к континентальному склону, а глубоководная ветвь не зависит от направления склона.

Положение САФ-с, определенное по максимуму градиента уровня моря, находится на расстоянии 8 км от максимальных скоростей течения по данным судового промера скорости. При этом по данным альтиметрии на регулярной сетке изолиния АДТ 23 см, принятая для локализации САФ-с, наблюдается на расстоянии около 50 км от максимума градиента и в 60 км от ядра течения. Методы определения положения САФ-гл по фиксированной изолинии АДТ и по максимуму градиента АДТ локализуют фронт в зоне больших скоростей главной ветви САФ на расстоянии менее 10 км друг от друга. Таким образом, в данной конкретной ситуации два выбранных критерия для определения положения фронта лучше совпадают для САФ-гл: расхождение в случае САФ-с гораздо более существенное. В следующем разделе эти расхождения проанализированы на основе всего длинного ряда альтиметрических наблюдений.

3.2. Определение положения фронтов по градиенту уровня моря

Ранее в ряде классических работ был сделан вывод о соответствии струй АЦТ фиксированным уровням АДТ, а также приведены их конкретные значения, что стало наиболее удобным методом быстрого определения положения фронтов АЦТ в пространстве [2, 3, 10, 42, 43, 45]. В работе [10] также приведена карта распределения линейного тренда АДТ в мм/год, рассчитанного на основе спутниковых наблюдений с 1993 по 2008 гг. Исследуемый в настоящей работе участок трека альтиметров находится в зоне восходящего тренда со скоростью от 0 до 2 мм/год (среднее значение для Мирового океана на данный момент составляет

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

2.94 \pm 0.05 мм/год [16]). Учитывая тренд изменения АДТ по времени, можно предположить смещение критерия, используемого для определения положения фронтов. В таком случае со временем фронты не будут совпадать с рассчитанными ранее уровнями АДТ, особенно при исследовании положения фронта с помощью альтиметрии на больших временны́х масштабах. Поэтому в данной работе исследуется способ определения положения фронта на основе максимума градиентов уровня моря, который не должен быть подвержен подобному смещению во времени.

На исследуемом участке спутникового трека наблюдались максимумы значений градиента в диапазоне от 0.3 до 0.6 см/км для САФ-с, при этом градиент САФ-гл достигал 1.1 см/км. Осредненные данные за весь период спутниковых наблюдений показали совпадение максимумов градиента со значением АДТ 30 см (САФ-с) и 4 см (САФ-гл). Положение фронтов варьируется от 0 до 45 км (САФ-с) и от 45 до 320 км от кромки шельфа (САФ-гл).

На рис. 4 представлены результаты анализа вдольтрековых измерений Jason-3 за 26.01.2020 и 15.02.2020. Уровень моря уменьшается с севера на юг неравномерно, образуя зоны максимальных градиентов АДТ. Стоит отметить несовпадение положения максимума градиента какому-либо конкретному уровню АЛТ, выбранному для определения самого северного фронта АЦТ. Для САФ-с расстояние между этими двумя точками по данным измерений 26 января составляет около 20 км. На 15 февраля расстояние между изобатой и градиентом составляет 37 км, что существенно больше характерной ширины течения (15–20 км). Распределение градиента АДТ на регулярной сетке показано на рисунке 5, на котором отмечены также уровни АДТ 23 и -10 см. Вдоль изобаты 300 м наблюдается повышенный градиент АДТ, совпадающий по расположению с максимальными скоростями течений, измеренными SADCP. Уровень АЛТ 23 см на протяжении всего пролива Дрейка не совпадает с положением максимальных значений градиента и находится от них на расстоянии от 50 до 110 км. Градиент уровня моря, соответствующий САФ-гл, составляет от 0.3 до 0.6 см/км; при этом максимум этого градиента удален от изолинии уровня АДТ –10 см не более чем на 20 км.

Изолинии АДТ в локальных максимумах градиента принимают широкий диапазон значений за весь период спутниковых измерений: для САФ-с – от –1 до 55 см, для САФ-гл – от –50 до 40 см. Такой разброс значений изолиний АДТ, соответствующих положению фронта, говорит о возможной неточности определения положения фронтов по любым фиксированным значениям изолиний уровня моря.



Рис. 4. Значения АДТ (синяя линия) по данным спутника Jason-3 на 26.01.2020 (а) и 15.02.2020 (б). Красной линией представлены значения градиента АДТ по данным вдольтрековой альтиметрии. Сплошной светло-зеленой линией отмечено положение локального максимума градиента (по модулю) для САФ-с, темно-зеленая соответствует положению локального максимума градиента (по модулю) для САФ-гл. Штриховые светло-зеленая и темно-зеленая линии показывают положение изолиний АДТ 23 и –10 см соответственно. Рельеф дна вдоль разреза представлен по данным GEBCO, 2021 [24].



Рис. 5. Распределение градиента АДТ по данным спутниковой альтиметрии на дату 06.02.2020. Штриховыми линиями показаны изолинии АДТ 23 см и –10 см. Локальные максимумы градиента АДТ в районе САФ-с и САФ-гл соединены тонкой и толстой сплошными черными линиями, соответственно. СТD-станции 6 февраля 2020 г. показаны красными точками, маршрут НИС "*Академик Мстислав Келдыш*" во время попутных измерений скоростей течений бортовым профилографом скорости – красной линией. Черной тонкой сплошной линией отмечен подспутниковый трек № 28 Jason-3.



Рис. 6. Осредненные по годам значения АДТ, соответствующие максимумам градиента уровня в районе САФ-с (а) и САФ-гл (б). Осредненные значения АДТ показаны тонкой и толстой зелеными линиями соответственно. Серой линией выделено среднее значение АДТ с 1993 по 2020 гг. для каждого фронта (30 см для САФ-с и 4 см для САФ-гл). Оранжевая линия показывает восходящий тренд изменения АДТ по времени. Светло-оранжевой зоной выделен доверительный интервал для тренда.

По результатам осреднения по годам (рисунок 6) значений АДТ, соответствующих максимуму градиента АДТ (и, соответственно, положению максимума скоростей течений вдоль фронтов АЦТ), обнаружен восходящий тренд. Для оценки значимости тренда использовался t-критерий Стьюдента применительно к коэффициентам линейной регрессии. В качестве нулевой гипотезы рассматривалось отсутствие временного тренда АЛТ. то есть значение АДТ постоянно и равно среднему за 28 лет (30 см для САФ-с и 4 см для САФ-гл), или, в терминах линейной регрессии, угловой коэффициент равен 0. Полученные значения *t*-критерия и *р*-критерия приведены в таблице 1. Для рассчитанных линейных трендов построенные доверительные интервалы 95% вероятности представлены на рисунке 6. В качестве меры описания линейной моделью полученного ряда данных использовался коэффициент Пирсона. Описанный выше набор статистических метрик был рассчитан и для полных рядов АДТ для САФ-с и САФ-гл (табл. 1).

Согласно определению критерия Стьюдента, значения *t*-критерия показывают, во сколько раз разница тестируемой характеристики и нулевой гипотезы превышает стандартную ошибку исследуемой характеристики. Из этого факта и предположения о квазинормальном распределении коэффициентов регрессии для временного ряда АДТ следует, что при *t*-критерии, большем трех, нулевая гипотеза не подтверждается с вероятностью более 99%. При анализе р-критерия традиционно выбирается граничное значение, равное 0.05. Если полученный р-критерий меньше данного значения, нулевая гипотеза является статистически неоправданной. Исходя из полученных значений р-критерия, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза об отсутствии тренда не является действительной, что дает возможность утверждать обратное, то есть наличие статистически значимого тренда. Рассчитанные для рядов АДТ коэффициенты Пирсона оказались в диапазоне от 0 до 0.5 во всех случаях, кроме среднегодовых значений АДТ; такой результат – следствие боль-

Таблица 1. Статистические метрики Т-тестирования тренда временной изменчивости критерия АДТ для выделения САФ-с и САФ-гл по полному ряду данных и по среднегодовым значениям при нулевой гипотезе "k = 0" (отсутствие тренда). В таблице представлены *t*-критерий, *p*-критерий, коэффициент Пирсона (R) и коэффициент линейной регрессии (k) с 95% доверительным интервалом

	<i>t</i> -критерий	<i>р</i> -критерий	R	k ± дов. инт (мм/год)
АДТ САФ-с	5.86	1×10^{-8}	0.33	4.03 ± 1.35
АДТ САФ-гл	3.35	9×10^{-4}	0.12	2.53 ± 1.48
Среднегодовые АДТ САФ-с	5.92	3×10^{-6}	0.76	4.08 ± 1.42
Среднегодовые АДТ САФ-гл	2.72	0.01	0.47	2.47 ± 1.86

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 7. Среднегодовое положение САФ-с и САФ-гл относительно кромки шельфа. Штриховыми линиями показано среднегодовое положение изолиний АДТ 23 и −10 см. Серой линией выделено среднее положение фронтов и изолиний АДТ с 1993 по 2020 гг., соответствующие значения подписаны справа от каждого графика. Оранжевая линия показывает тренд изменения по времени. Светло-оранжевой зоной выделен доверительный интервал для тренда. Ноль расстояния по вертикальной оси соответствует первой точке спутниковых измерений на треке № 28 Торех/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля в координатах 55.977° S, 66.941° W.

шого разброса начальных данных, из-за чего линейная модель не способна полностью описать временную изменчивости АДТ. Однако в данной работе линейная регрессия используется только для выявления общего тренда в данных, для этой задачи линейная аппроксимация применима даже при относительно низких R. Полученный годовой тренд отражен в коэффициентах регрессии с 95% доверительными интервалами. Из значений k следует, что для всех анализируемых рядов характерен устойчивый положительный тренд, для САФ-с он составил 4 мм/год, для САФ-гл – 2.5 мм/год. Доверительные интервалы показывают, что с вероятностью 95% процентов искомый тренд лежит в рассчитанном диапазоне, который даже в крайних случаях является положительным, что также является одним из признаков его статистической значимости.

Исходя из данных тренда, можно сделать вывод, что положение прибрежной вдольсклоновой струи САФ со временем соответствует все более высоким значениям АДТ. Если в 1993 году САФс находился, по нашим расчетам, на уровне от 27 до 28 см, то к 2020 году в среднем этот фронт наблюдался на уровне 38 см. Максимумы градиента главной ветви этого фронта за 28 лет альтиметрических измерений сместились с изолинии АДТ –3 см до уровня 6.5 см к 2020 году. Тренд увеличения уровня моря в районе САФ-с в 1.4 раза быстрее обшемирового тренда повышения уровня моря [16]. САФ-с сохраняет свое расположение относительно кромки шельфа, поэтому данный тренд может говорить о повышении уровня моря в конкретном районе над шельфом и континентальным склоном. Изолинии АДТ, встречающиеся в зоне действия максимальных градиентов САФ-гл, имеют тренд, согласующийся с общемировым трендом и результатами расчета регрессии в [10]. Таким образом, обнаруженные тренды уровня моря в районах ветвей САФ важно учитывать при определении их положения на основе фиксированных значений АДТ. Иными словами, любой заданный критерий. выбранный на основе фиксированного значения АДТ, через несколько лет перестанет быть корректным из-за повышения уровня моря.

3.3. Пространственное смещение $CA\Phi$

Используя метод определения положения ветвей САФ, предложенный в настоящей работе, проведена оценка смещения фронтов относительно кромки шельфа (рис. 7). За ноль взята первая точка спутниковых измерений на треке № 28 Торех/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля, положительное направление оси соответ-



Рис. 8. Сезонное положение САФ-с и САФ-гл относительно кромки шельфа, штриховыми линиями показано среднемесячное положение изогипс 23 и −10 см. Ноль расстояния по вертикальной оси соответствует первой точке спутниковых измерений на треке № 28 Topex/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля. Представлены средние данные за 28-летний период с 1993 по 2020 гг.

ствует направлению на юго-восток, в центральную часть пролива Дрейка. Изобата 200 м располагается в 27 км южнее первого спутникового измерения. Исходя из этого, в среднем САФ-с находится на расстоянии 15 км от кромки шельфа и не отходит от нее дальше чем на 25 км. Положение САФ-гл за 28 лет колебалось в диапазоне от 97 до 148 км от кромки шельфа, в среднем фронт отходил вглубь пролива на 123 км. Тренд смещения САФ-гл составляет 0.5 км в год, с 1993 по 2020 гг. суммарно фронт отдалился на 15 км. Для оценки значимости данного тренда использовался тест Стьюдента, на основе анализа доверительных интервалов и расчета р-критерия с доверительным интервалом в 95%, который не показал данный тренд значимым (p-критерий = 0.074) по имеющемуся набору данных. Тренда в смещении северного фронта также не обнаружено.

При оценке пространственного смещения фиксированных уровней АДТ от кромки шельфа обнаружился устойчивый тренд смещения изолинии 23 см на 1.6 км/год в южном направлении (*p*-критерий = 7×10^{-6}). К 2020 году данная изолиния по среднегодовым данным отдалилась на 45 км от положения 1993 года и находится в среднем в 75 км от кромки шельфа. Изолиния –10 см смещается на юг со скоростью 1.5 км/год, что составило 42 км за 28 лет, то есть примерно с той же скоростью, что и изолиния 23 см.

Для исследования сезонных колебаний положения ветвей САФ было проведено осреднение полученных данных по положению фронтов за весь 28-летний период (рис. 8). Было выявлено, что САФ-с сезонно не смещается, в то время как главная ветвь САФ в марте уходит севернее, приближаясь к шельфу на расстояние около 100 км, в ноябре, наоборот, уходит южнее на 40 км. Изолинии АДТ 23 и -10 см в летние и зимние месяцы Южного полушария смещаются немного южнее, а весной и осенью стремятся к шельфу. При этом уровень моря в точках максимальных градиентов САФ-гл принимал наибольшие значения в периоды с октября по март и с мая по июль — от 5 до 6 см, уменьшаясь в апреле до 2.3 см, а также в августе и сентябре до 1.2 см. САФ-с показал такой же характер сезонного хода относительно изолиний АДТ. С октября по март северная ветвь наблюдалась на уровнях АДТ от 29 до 33 см, максимальные значения также были отмечены в мае и составили 33.6 см. С июля по октябрь уровень моря в зоне действия фронта в среднем понижался от 28.5 до 26 см, с минимальным значением в сентябре.

Одной из возможных причин смещения фронтов АЦТ может быть влияние западных ветров. Авторы [25, 26] указывают на связь изменения положения фронтов с такими явлениями, как Эль-Ниньо/Южное колебание и Антарктическое колебание, а также на слабый вклад ветра в данное явление. Проведенное исследование влияния плавучести и западных ветров на Южный океан [38] на основе численных моделей и натурных данных показало, что меридионально неравномерное потепление АЦТ приводит к неравномерному повышению уровня моря и столь же неравномерно увеличивает геострофические скорости течений, что может оказывать воздействие на смещение фронтов. Отмечается также большой вклад влияния силы плавучести в изменение поверхностной горизонтальной циркуляции и более сильное потепление северных ветвей АШТ в сравнении с температурными изменениями южной части АЦТ. Необходимо отметить, что, согласно некоторым работам, масштаб смещения фронтов Южного океана зависит от методики определения этих фронтов [11]. Авторы работы [38] также обращают внимание на то, что в условиях изменения климата Южного океана, в частности, вследствие изменения топографии морской поверхности, использование фиксированных изолиний уровня моря может давать некорректные результаты в оценке положения АЦТ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется пространственная структура двух ветвей САФ, самого северного фронта АЦТ в проливе Дрейка, а также временная изменчивость положения этих ветвей. Для этого используются как данные натурных наблюдений, так и ряд данных спутниковой альтиметрии с 1993 по 2020 гг. В частности, в работе рассмотрена термохалинная структура северной ветви САФ по натурным данным 79-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш". По данным СТД-зондирований отмечено ослабление вертикальной стратификации в зоне наибольших скоростей течения северной ветви САФ у кромки шельфа. Распрелеление скоростей течений по данным SADCP показало две ветви САФ: северная расположена над кромкой шельфа, главная ветвь – на расстоянии 320 км от северной ветви.

Для оценки долговременной изменчивости положений САФ-с и САФ-гл в северной части пролива Дрейка фронты определялись по данным спутниковой альтиметрии на основе двух различных методов: по фиксированным значениям уровня моря, предложенным в [10], и по максимуму горизонтального градиента АДТ. Было показано, что два критерия хорошо совпадают для основной ветви САФ. Прибрежная ветвь САФ не соответствует изолинии АДТ 23 см на протяжении всего пролива Дрейка. В основном положение самой северной ветви АЦТ стабильно привязано к кромке шельфа и находится на расстоянии 20 км от среднего положения изолинии 23 см. В зоне действия САФ-с отмечен тренд повышения уровня моря. Значения АДТ, находящиеся в точках максимального градиента АДТ, увеличиваются со скоростью 4 мм/год. К тому же, изолиния 23 см отдаляется от кромки шельфа со скоростью 1.6 км/год, что подтверждает локальный тренд изменения АДТ, рассчитанный авторами [10].

Изменчивость положения фронтов относительно определенных уровней АДТ хорошо видна по вдольтрековой альтиметрии. Альтиметрические данные на регулярной сетке позволяют исследовать пространственную структуру АЦТ и его отдельных ветвей. Однако в ходе данной работы было установлено, что при определении местоположений фронтов важно принимать во внимание многолетнюю изменчивость уровня моря, что также было отмечено авторами работ [4, 43]. Проведенный анализ показал, что привязка фронтов к определенным постоянным изолиниям АДТ со временем теряет свою актуальность из-за существующих локальных трендов изменения морской топографии, а, возможно, и по другим причинам, связанным с изменениями в структуре отдельных фронтов. Расхождение в определении положения фронта, выполненном по фиксированным изолиниями АДТ, может достигать 50 км и более, что, безусловно, является важным фактором при оценке состояния Южного океана и происходящих в этом районе климатических изменений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НИС "*Академик Мстислав Келдыш*" за содействие в проведении экспедиционных работ.

Данные вдольтрековой альтиметрии доступны на https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/SEALEVEL_GLO_PHY_L3_MY_008_062 (дата обращения 29.11.2021) Альтиметрия на регулярной сетке доступна на https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_ PHY_L4_MY_008_047 (дата обращения 20.05.2022).

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания FMWE-2021-0002 (судовые расходы и сбор натурных данных) и при поддержке гранта РНФ 22-77-10004 (обработка данных натурных наблюдений и анализ спутниковой альтиметрии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Бурков В.А.* Антарктические струи // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 169–177.
- 2. Кошляков М.Н., Савченко Д.С., Тараканов Р.Ю. Энергия струй Антарктического циркумполярного течения и синоптических вихрей в приповерхностном слое Южного океана // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 325–334. https://doi.org/10.31857/S0030-1574593325-334
- 3. Кошляков М.Н., Репина И.А., Савченко Д.С. и др. Структура и изменчивость синоптических возмущений океанских течений в проливе Дрейка и море Скотия // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 191–200.

https://doi.org/10.31857/S0030-1574592191-200

- Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Структура фронтов в районе к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. и спутниковой альтиметрии // Исследовано в России: электрон. науч. журн. 2010. https://doi.org/10.7868/S0030157414030137
- 5. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 725–736. https://doi.org/10.7868/S003015741405013X
- Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов 2010 и 2011 гг. // Современные проблемы термогидромеханики океана. 2017. С. 167–169.

https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-167-169

- 7. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 541–555. https://doi.org/10.1134/S003015741804010X
- 8. *Чурин Д.А.* Структура струй Антарктического циркумполярного течения в море Скотия по данным спутниковой альтиметрии и судовым наблюдениям в 2000 и 2005 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2. № 1. С. 61–69.
- 9. Artana C., Lellouche J.M., Park Y.H. et al. Fronts of the Malvinas Current System: surface and subsurface expressions revealed by satellite altimetry, Argo floats, and Mercator operational model outputs // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. № 8. P. 5261–5285.

https://doi.org/10.1029/2018JC013887

- 10. Barré N., Provost C., Renault A. et al. Fronts, meanders and eddies in Drake Passage during the ANT-XXIII/3 cruise in January–February 2006: A satellite perspective // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. V. 58. № 25–26. P. 2533–2554. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.01.003
- Chapman C.C., Lea M.A., Meyer A. et al. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate // Nat. Clim. Change. 2020. V. 10. P. 210–219. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0705-4
- 12. Chelton D.B., Schlax M.G., Witter D.L. et al. Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1990. V. 95. № C10. P. 17877–17903. https://doi.org/10.1029/JC095iC10p17877
- Deacon G.E.R. The hydrology of the Southern Ocean // Discovery Rep. 1937. V. 15. P. 3–122.
- Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and-2 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. № C8. P. 19477–19498. https://doi.org/10.1029/2000JC900063
- Egbert G.D., Erofeeva S. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Ocean Tech. 2002. V. 19. P. 183–204. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- 16. *Fang M., Zhang J.* Basin-scale features of global sea level trends revealed by altimeter data from 1993 to 2013 // Journal of Oceanography. 2015. V. 71. № 3. P. 297–310. https://doi.org/10.1007/s10872-015-0289-1
- Ferrari R., Artana C., Saracen M. et al. Satellite altimetry and current-meter velocities in the Malvinas Current at 41 S: Comparisons and modes of variations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. N

 № 12. P. 9572–9590. https://doi.org/10.1002/2017JC013340

18. *Ferrari R., Provost C., Renault A. et al.* Circulation in Drake Passage revisited using new current time series and satellite altimetry: 1. The Yaghan Basin // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. № C12. https://doi.org/10.1029/2012JC008264

https://doi.org/10.1029/2011JC006999

- Frey D.I., Krechik V.A., Gordey A.S. et al. Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCP measurements and satellite altimetry // Front. Mar. Sci. 2023. P. 10:1111541. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1111541
- Frey D.I., Piola A.R., Krechik V.A. et al. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. V. 126. № 4. V. e2020JC016727. https://doi.org/10.1029/2020JC016727
- Frey D.I., Piola A.R., Morozov E.G. Convergence of the Malvinas Current branches near 44° S // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2023. P. 104023. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104023
- 23. Gaube P., Barceló C., McGillicuddy D.J. Jr. et al. The use of mesoscale eddies by juvenile loggerhead sea turtles (Caretta caretta) in the southwestern Atlantic // PloS one. 2017. V. 12. № 3. P. e0172839. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172839
- 24. GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f
- 25. *Gille S.T.* Meridional displacement of the Antarctic circumpolar current // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2014. V. 372. № 2019. P. 20130273.
- Kim Y.S., Orsi A.H. On the variability of Antarctic Circumpolar Current fronts inferred from 1992–2011 altimetry // Journal of Physical Oceanography. 2014. V. 44. № 12. P. 3054–3071. https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0217.1
- Lenn Y.D., Chereskin T.K., Sprintall J. Improving estimates of the Antarctic Circumpolar Current streamlines in Drake Passage // Journal of Physical Oceanography. 2008. V. 38. № 5. P. 1000–1010. https://doi.org/10.1175/2007JPO3834.1
- Matano R.P., Palma E.D. On the upwelling of downwelling currents // Journal of Physical Oceanography. 2008. V. 38. № 11. P. 2482–2500. https://doi.org/10.1175/2008JPO3783.1
- 29. *Morozov E.G., Frey D.I., Fofanov D.V. et al.* The extreme northern jet of the Antarctic Circumpolar Current // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. № 5. P. 4. https://doi.org/10.2205/2020ES000717
- 30. *Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A. et al.* Multidisciplinary observations across an eddy dipole in the inter-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

action zone between subtropical and subantarctic waters in the Southwest Atlantic // Water. 2022. V. 14. № 17. V. 2701.

https://doi.org/10.3390/w14172701

- 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
- 32. Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ansorge I., Swart S. Jets and transport of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2014. V. 7. № 3. P. 23–28. EDN TAQWLB.
- Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Demidova T.A. et al. Velocity and transport of the Falkland Current at 46° S // Russian Journal of Earth Sciences. 2016. V. 16. № 6. P. 1–4.

https://doi.org/10.2205/2016ES000588

- Nowlin W.D. Jr., Clifford M. The kinematic and thermohaline zonation of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage // Journal of Marine Research. 1982. V. 40. P. 481–507.
- 35. Orsi A.H., Whitworth III T., Nowlin W.D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. V. 42. № 5. P. 641–673. https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W
- 36. Provost C., Renault A., Barré N. et al. Two repeat crossings of Drake Passage in austral summer 2006: Shortterm variations and evidence for considerable ventilation of intermediate and deep waters // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. V. 58. № 25–26. P. 2555–2571. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.06.009
- 37. Salyuk P.A., Mosharov S.A., Frey D.I. et al. Physical and biology features of the waters in the outer Patagonian

shelf and the Malvinas Current // Water. 2022. 14 (23). https://doi.org/10.3390/w14233879

- 38. Shi J.R., Talley L.D., Xie S.-P. et al. Effects of buoyancy and wind forcing on Southern Ocean climate change // Journal of Climate. 2020. V. 33. № 23. P. 10003–10020. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0877.1
- 39. Sievers H.A., Emery W.J. Variability of the Antarctic Polar frontal zone in the Drake Passage—summer 1976–1977 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1978. V. 83. № C6. P. 3010–3022.
- 40. *Sievers H.A., Nowlin W.D. Jr.* The stratification and water masses at Drake Passage // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1984. V. 89. № C6. P. 10489–10514. https://doi.org/10.1029/JC089iC06p10489
- 41. Sokolov S., Rintoul S.R. Structure of Southern Ocean fronts at 140° E // Journal of Marine Systems. 2002. V. 37. № 1–3. P. 151–184. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00200-2
- 42. Sokolov S., Rintoul S.R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts:
 1. Mean circumpolar paths // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2009. V. 114. № C11. https://doi.org/10.1029/2008JC005108

https://doi.org/10.1029/2008JC005248

- 44. *Tarakanov R.Yu.* Long-term linear meridional shift of the jet structure of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa // Oceanology. 2021. V. 61. P. 815–829. https://doi.org/10.1134/S000143702106031X
- 45. Venables H., Meredith M.P., Atkinson A. et al. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012. V. 59. P. 14–24.

https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.012

Structure and Temporal Variability of the Northern Branch of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage

S. A. Ostroumova^{*a*, *b*, *#*}, I. D. Drozd^{*a*, *c*, *d*}, D. I. Frey^{*a*, *e*, *f*}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ^bRussian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia
 ^cObukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ^dMoscow State University, Moscow, Russia
 ^eMarine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 ^fMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

[#]e-mail: ost.sophisticated@gmail.com

The Antarctic Circumpolar Current plays the key role in the circulation of the Southern Ocean and affects the distribution of heat by the ocean on the global scale. The study of the dynamics and structure of this current becomes especially important in a changing climate. The current is well revealed by satellite altimetry data, which makes possible to study temporal and spatial variability of its structure at different scales. In these studies, the methods for determining the position of individual fronts of the Antarctic Circumpolar Current based on satellite altimetry data become especially important. In this work, we compare various approaches

СТРУКТУРА И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

for detection of front locations. The structure of the northernmost branch of the Antarctic Circumpolar Current, the Subantarctic Front, and its spatial and temporal variability was studied based on satellite altimetry data from 1993 to 2020 and the results of a hydrographical section occupied by the R/V "*Akademik Mstislav Keldysh*" in the northern part of the Drake Passage in February 2020. We selected a 350 km long part of the TOPEX/Poseidon and Jason-1,2,3 satellite altimeter track from Tierra del Fuego to the south for the analysis of the dynamics of the front. Criteria for determining the position of the northern and main branches of the Subantarctic Front are presented based on satellite altimetry data. A long-term shift of the position of the fronts relative to the previously accepted levels of absolute dynamic topography has been found. It was found that the accuracy of determining the position of fronts using fixed values of dynamic topography may decrease with time, in particular due to changes in the mean sea level. A statistically significant long-term trend of sea level rise in the region of the Subantarctic Front was found. This trend is 4 mm/yr for the northern branch and 2.5 mm/yr for the main branch.

Keywords: Subantarctic Front, Antarctic Circumpolar Current, satellite altimetry, jets, Drake Passage

——— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.466

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННА́Я ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ВОД В ПРОЛИВЕ АНТАРКТИКА

© 2023 г. О. А. Зуев^{1, *}, Д. И. Фрей¹, И. Д. Дрозд^{1, 2}, В. А. Кречик¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия ²Московский государственный университет, Москва, Россия

> *e-mail: qillous@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 временну́ю 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 большое количество CTD-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 солености 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 CTD-данные из разных из разных источников, в том числе из базы данных WOD (World Ocean Database, 2018), и на их основании на их основании описать пространственно-временну́ю 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.

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 продольн	ный 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		

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

Собственные измерения

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

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

410К), 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° С, первоначальную точность 0.001°С, среднюю стабильность 0.002°С/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 WOCE, 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 (PA-10X), 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° С, первоначальную точность 0.001°С, разрешение 0.0001°С. 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°С по температуре и 0.00004 сименс/м по электропроводности. Точность измерений составляет 0.02°С 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 СТД-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 солености [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 солености 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 солености 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 солености и потенциальной температуры в средней и – в большей степени – южной частях. Такое распределение отличалось от среднегодового баланса - как правило холодные и соленые 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 солености незначительно, потенциальная температура плавно понижалась от -0.60 до -1.20°С.

Поперечный разрез 2022 г. (рис. За, Зб) выявил более сложную структуру вод в проливе. У обоих берегов пролива Антарктика в верхнем стометровом слое наблюдалась пониженная соленость 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 солености и потенциальной температуры на станции 6623 достигали 34.11 епс и -0.14°С соответственно. Значительные градиенты потенциальной температуры и солености (0.49°С 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 солености и потенциальной температуры были незначительно больше -0.54° С и 0.20 епс на 100 м соответственно. Опреснение более равномерно и максимально на самой восточной точке разреза, где соленость 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 солености (б, г) на поперечном и продольном разрезах 2022 г. Номера станций указаны над рисунками, положения станций выделены серыми линиями. Шкалы потенциальной температуры и солености 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 МЕОР. Осенне-зимний период 2010 г. (рис. 5а, 5б) характеризовался постепенным повышением солености на 0.30 епс, с 34.30 епс в конце марта до 34.60 епс в августе. При этом за счет мелководности северной части пролива распределение по вертикали было практически однородно. Изменение потенциальной температуры наблюдалось только в начале осеннего периода, достигая значений около -1.86° С в поверхностном слое в конце апреля, после этого не менялось. Указанная потенциальная температура была близка к температуре замерзания морской воды, которая для солености 34.50 епс и атмосферного давления составляет -1.87° С, согласно уравнению EOS80 [11]. Дальнейшее охлаждение идет на образование льдов, что и является основной причиной повышения солености в течение зимнего периода.

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



Рис. 4. Распределение потенциальной температуры (а, в, д) и солености (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 солености 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 температуры θ и солености 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 солености 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 солености 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 соленость, 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°С, изменения солености были не так значительны по причине постепенного таяния льдов. Однако совпадение кривых в разных точках пролива отличное, отклонения потенциальной температуры и солености не превышали 0.07°С и 0.03 епс и 0.24°С 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. Вертикальная стратификация вод определялась изменениями как температуры, так и солености — поверхностный слой более теплый и опресненный, глубже потенциальная температура понижается, соле-



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. 0, S-диаграмма за разные годы наблюдений в летний период времени в проливе Антарктика. 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° С и повышенная соленость 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



Рис. 8. 0,S-кривые за 2020 (нижняя левая часть диаграммы) и 2022 (верхняя правая часть диаграммы) годы наблюдений. Дополнительными черными точками выделены 0,S-кривые станций 7324, 7325, 7326 и 7333. Серыми линиями обозначена потенциальная плотность на поверхности моря.

охлажденный опресненный верхний слой. Таким образом на части станций наблюдалась вре́менная 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 соленость менялась лишь в промежутке 34.50-34.55 епс, а минимальные значения потенциальной температуры не достигали даже -1.25° С. Однако необходимо отметить, что схожих аномалий в прилегающих районах (пролив Брансфилда и море Уэдделла) не наблюдалось.

Месяц, год	Температура минимальная	Температура средняя	Соленость максимальная	Соленость 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

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

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 солености по всему проливу с небольшими отклонениями в самой северной и южной частях. При этом наблюдается стратификация по всей глубине – изменение потенциальной температуры и солености достигают 1.50°С и 0.40 епс соответственно. Структура вод в 2022 г. кардинально отличается. Сразу выделяются два профиля, полученных в северной части – практически одинаковая соленость около 34.55 епс и незначительно меняющаяся от -0.38 до -0.07°С потенциальная температура. Далее идет множество точек в средней части пролива со слабо опресненным и теплым верхним 100-150 м слоем. И, наконец, профили самой южной и самой западной станций: верхний холодный и опресненный 50 м слой, резкое повышение потенциальной температуры и солености 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°С; аналогичное отличие в солености 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. Различие в значениях потенциальной температуры и солености поверхностного и придонного слоев в среднем составляют 1°С 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

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

пространственной изменчивости потенциальной температуры и солености различия в значениях в поверхностном слое составляют: в 1982 г. 0.58°С и 0.17 епс, в 2022 г. 0.48°С и 0.15 епс, соответственно. В придонном слое различия в потенциальной температуре могут быть больше за счет разницы глубин, градиент солености 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 солености вод в проливе, вызванные сезонными колебаниями, наиболее значительны. Пространственная изменчивость температуры и солености 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 непостоянстве 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°С, 34.20 епс-34.60 епс. Редкие случаи присутствия вод с положительной потенциальной температурой или соленостью 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 натурных данных) и при поддержке гранта РНФ 22-77-10004 (анализ автономных измерений из базы данных МЕОР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галкин С.В., Минин К.В., Удалов А.А., Чикина М.В., Фрей Д.И., Молодцова Т.Н., Симаков М.И., Головань О.А., Сошнина В.А., Неретин Н.Ю., Спиридонов В.А. Донные сообщества бассейна Пауэлла // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 233–249.
- 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 эко-

системные 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
- 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.
- 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 NES-DIS 87.
- 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
- 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
- Damini B. Yu., Kerr R., Dotto T.S. & Mata M.M. Longterm 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
- 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.
- Frey D., Krechik V., Morozov E., Drozd I., Gordey A., Latushkin A., Mekhova O., Mukhametianov 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

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

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
- 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

 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

- 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
- 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

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.

- 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.
- Treasure A.M., F. Roquet F., Ansorge 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., Mc-Mahon 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
- 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
- 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.pocean.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
- 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

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^bMoscow State University, Moscow, Russia [#]e-mail: qillous@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

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ЗУЕВ и др.

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

538

———— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.466.8:551.465.4

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОГО ТРЕНДА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАССЕЙНА ПАУЭЛЛА

© 2023 г. А. А. Букатов¹, Н. М. Соловей^{1, *}, Е. А. Павленко¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская 2, Севастополь, 299011 Россия *e-mail: nele7@mail.ru Поступила в редакцию 27.10.2022 г. После доработки 01.11.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

На основе гидрологических данных 79-го рейса экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш" (16.01–6.02.2020) и данных World Ocean Database-2018 за январь—февраль с 1975 по 2020 гг. дана оценка тренда динамического состояния вод бассейна Пауэлла моря Уэдделла. В каждом узле четверть-градусной сетки строился линейный тренд рассчитанных величин максимума частоты плавучести и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости внутренних волн. Показано, что юго-западная и северо-западная части бассейна Пауэлла существенно различаются по своим гидрофизическим характеристикам. На северо-западе бассейна линейный тренд максимума частоты вяйсяля-Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости положительные. В юго-западной части бассейна тренд максимума частоты Вяйсяля-Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости положительные. В юго-западной части бассейна тренд максимума частоты вяйсяля-Брента и амплитуды вертикальной составляющей скорости положительные.

Ключевые слова: бассейн Пауэлла, частота Вяйсяля-Брента, внутренние волны, вертикальная составляющая скорости, линейный тренд

DOI: 10.31857/S0030157423040020, EDN: YBNAJP

введение

В последние десятилетия отмечаются значительные климатические изменения, которые особенно заметны в высокоширотных регионах. Согласно последнему докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, оба полярных океана продолжают нагреваться, причем Южный океан играет непропорционально большую и важную роль в глобальном повышении температуры Мирового океана [19].

Из-за сложных ледовых условий моря Южного океана являются наименее изученными регионами, но с появлением искусственных спутников Земли количество наблюдений за различными районами океана значительно увеличилось. Однако они характеризуется значительной пространственной неравномерностью. В высоких широтах спутниковые наблюдения затруднены из-за неподходящих углов падения солнечных лучей на поверхность воды, из-за постоянной облачности и сезонного закрытия поверхности воды льдом [6, 12, 17].

Море Уэдделла — самое большое и глубокое окраинное море атлантического сектора Южного

океана у берегов западной Антарктиды, где происходит интенсивное взаимодействие системы океан-атмосфера и вертикальный обмен [14, 18]. С севера оно ограничено хребтом Скотия, на котором расположены дуги Южных Шетландских и Южных Оркнейских островов. С Тихим океаном море соединено проливом Брансфилда. Глубоководный, обособленный от основной котловины моря, бассейн Пауэлла лежит в северо-западной части моря Уэдделла к востоку от пролива Брансфилда. Здесь воды Антарктического циркумполярного течения встречаются с водами круговорота моря Уэдделла. Из-за своего географического положения бассейн Пауэлла играет связующую роль между экосистемами моря Уэдделла, моря Скотия и пролива Брансфилда, обеспечивая накопление и перераспределение криля, поступающего с водами западной ветви круговорота Уэдделла [6, 9, 11, 16].

Внутренние волны (ВВ) играют важную роль в динамике океанов и морей. Они оказывают влияние на процессы горизонтального и вертикального обмена энергией, способствуют перемешиванию вод, обогащению их кислородом и


Рис. 1. Осредненные по акватории бассейна Пауэлла за январь-февраль профили солености и температуры для данных 79-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" (2020 г.) и WOD-2018 (1982, 1998, 2016 гг.).

питательными веществами, необходимыми для жизни морских организмов. В настоящей работе на основе экспедиционных и архивных данных дана оценка климатического тренда динамического состояния физической среды бассейна Пауэлла (55°–47° з.д. и 59°–63° ю.ш.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе использовались гидрологические данные, полученные в 79-м рейсе экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш" (16.01-6.02.2020), и данные World Ocean Database 2018 (WOD 2018). Рассматривался временной промежуток с 1975 по 2020 гг., из которого были выбраны 16 лет, наиболее хорошо обеспеченные гидрологическими данными за январь-февраль. Для каждого года создавались массивы осредненных значений температуры и солености в узлах четверть-градусной сетки, по которым рассчитывались профили плотности. Полученные профили тестировались на наличие инверсий и, при необходимости, корректировались путем замены инверсионных величин значениями, интерполированными по соседним горизонтам [1, 13]. Для каждого узла сетки рассчитывался профиль частоты Вяйсяля-Брента (N(z), цикл/час) по формуле

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}$$

где z – глубина, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность.

Определялся максимум частоты Вяйсяля-Брента по глубине ($N_{\max}(z)$, цикл/час) и глубина его залегания ($H_{N_{\max}(z)}$). Расчеты проводились до глубины 500 м, т.к. в этом слое определяются максимальные значения градиентов температуры и солености (рис. 1).

Исследование внутренних волн проводилось исходя из системы линейных уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости в форме Фьельдстада, которая имеет решение в виде суперпозиции плоских волн [8]. В частности, для вертикальной компоненты скорости w(x, y, z, t) (x, y – горизонтальные координаты, t – время) имеет место представление

$$w(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W^{(n)}(k, z) \times \exp\left\{i\left[k_x x + k_y y - \omega^{(n)}(k)t\right]\right\} dk_x dk_y,$$

где $\omega^{(n)}(k)$ — дисперсионное соотношение (собственная частота) для моды с номером *n* и волновым числом $k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$, $W^{(n)}(k, z)$ — амплитуда этой моды (собственная функция). Если использовать приближение Буссинеска, отфильтровать поверхностные волны и пренебречь вращением Земли, то $W^{(n)}(k, z)$ будет решением краевой задачи типа Штурма-Лиувилля с нулевыми граничными условиями на дне и свободной поверхности жидкости:

$$\frac{d^{2}W^{(n)}}{dz^{2}} + (\lambda^{(n)}N^{2} - k^{2})W^{(n)} = 0,$$

$$W^{(n)}(H) = W^{(n)}(0) = 0,$$

где $\lambda^{(n)} = (k / \omega^{(n)})^2 -$ собственное значение, H -глубина.



Рис. 2. Распределение температуры в бассейне Пауэлла на глубинах 5–500 м по данным экспедиции 79-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" (точками показаны гидрологические станции).

Данная спектральная задача соответствует определению собственных значений $\lambda^{(n)}$ и собственных функций $W^{(n)}(k, z)$ для каждого фиксированного значения волнового числа. Для численной реализации краевой задачи по заданному профилю N(z) строилась ее конечно-разностная аппроксимация. Полученная система линейных алгебраических уравнений решалась путем определения корней характеристического многочлена для ее матрицы [2].

Для исследования вертикальной структуры и дисперсионных свойств BB рассчитывались собственные значения и собственные функции для длин волн больше 200 м. Описанных в литературе наблюдений BB в Антарктическом регионе мало. При выборе интервала длин волн авторы обращались к работам [3, 5, 6], из которых следует, что в высоких широтах на радиолокационных изображениях наблюдаются внутренние волны с длинами > 200 м.

Известно, что первая мода дает наибольший вклад в энергетический спектр пакета волн [7], в связи с этим рассматривались амплитуды вертикальной составляющей скорости ($W^{(1)}(k, z)$) первой моды свободных внутренних волн. В работе в качестве иллюстрации приведены распределения максимальных значений амплитуды вер-

тикальной составляющей скорости ($W_{\max}^{(l)}(k, z)$) для длины волны 200 м.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате анализа экспедиционных измерений температуры воды по глубине были зафикси-



Рис. 3. Распределение максимума частоты плавучести в бассейне Пауэлла.

рованы две различные по структуре водные массы [10], между которыми простирается четко выраженная фронтальная зона (рис. 2). На северо-востоке бассейна — одна более теплая вода с подповерхностным холодным слоем, типичная для моря Уэдделла, и другая — вода адвективного происхождения, обнаруженная на юго-западе бассейна и поступившая из северо-западной, более мелководной части моря Уэдделла. В северозападную часть моря Уэдделла из южной части идет большой вынос льда и айсбергов. Плавающий лед не дает возможности солнечной радиации нагревать воду в летнее время, а внутренние волны перемешивают весь слой воды от поверхности до дна [4, 15]. На рис. 3 представлено распределение максимальных значений частоты Вяйсяля-Брента по исследуемой акватории. Видно, что гидрологическая ситуация меняется от года к году, но всегда есть условная граница между наибольшими и наименьшими значениями $N_{\rm max}(z)$. Наибольшие значения $N_{\rm max}(z)$ фиксируются, как правило, в восточной и юго-восточной частях бассейна Пауэлла. Соответственно, там же определяются наименьшие значения $W_{\rm max}^{(1)}(k, z)$ (рис. 4).

На рис. 5, 6 представлена межгодовая изменчивость вертикальной структуры плотности вод и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости внутренних волн в бассейне Пауэлла на разрезе по 51° з.д. Видно, что наибольшие

543



Рис. 4. Распределение максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости свободных ВВ (в условных единицах) в бассейне Пауэлла.

значения $N_{\max}(z)$ и наименьшие $W_{\max}^{(1)}(k,z)$ были в 1981, 2009, 2014 и 2020 гг. Отмеченные особенности проявляются на всех рассматриваемых широтах бассейна Пауэлла.

Для оценки пространственно-временной изменчивости гидрологических и динамических характеристик вод за весь период исследования в каждом узле сетки рассчитывался линейный тренд максимума частоты плавучести и максимума амплитуды вертикальной скорости ВВ. Рисунок 7 показывает, что в южной части бассейна Пауэлла имеется отрицательный тренд $W_{\rm max}^{(1)}(k,z)$, а в северной – положительный. И наоборот, в югозападной части бассейна – положительный тренд $N_{\rm max}(z)$, а в северной – отрицательный. В качестве иллюстрации приведены межгодовая изменчивость и тренды $N_{\max}(z)$ и $W_{\max}^{(1)}(k, z)$ в точках с координатами 54° з.д., 62° ю.ш. (рис. 8) и 52° з.д., 60° ю.ш. (рис. 9). Видно, что тренды имеют разнонаправленный характер. За рассматриваемый период времени максимум частоты Вяйсяля-Брента в точке 54° з.д., 62° ю.ш. увеличился на 2.8 цикл/час, а максимум амплитуды вертикальной составляющей скорости уменьшился на 4.4 у.е. (у.е. – условные единицы, поскольку собственный вектор матрицы всегда определяется с точностью до произвольного множителя [2]). В точке 52° з.д., 60° ю.ш. значение $N_{\max}(z)$ уменьшилось на 3.2 цикл/час, а $W_{\max}^{(1)}(k, z)$ увеличилась на 15.3 у.е.



Рис. 5. Межгодовая изменчивость максимума частоты плавучести на 51° з.д. и количество станций на акватории исследования.



Рис. 6. Межгодовая изменчивость максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости свободных BB (в условных единицах) на 51° з.д.

Отметим, что наблюдающиеся области с отрицательным трендом максимума частоты плавучести и положительным трендом глубины его залегания характеризуют ослабление стратификации вод в силу различных причин (перемешивание, изменение циркуляции и т.д.) и заглубление максимальных значений градиентов. Скорость заглубления $N_{\rm max}(z)$ при этом на порядок превосходит скорость уменьшения величины максимального градиента (рис. 7, 10).

В северной части бассейна Пауэлла линейные тренды $W_{\max}^{(1)}(k,z)$ и $H_{W_{\max}^{(1)}(z)}$ положительны (рис. 7, 10). Это означает, что существует тенденция увеличения волновой динамики вод и глубины залегания максимальных значений $W^{(1)}(k, z)$ за рассматриваемый временной период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе гидрологических данных, полученных в 79-м рейсе экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш" и данных WOD-2018 дана оценка климатического тренда динамического состояния физической среды бассейна Пауэлла.

Показано, что юго-западная и северо-западная части бассейна Пауэлла существенно различаются по своим гидрофизическим характери-



Рис. 7. Коэффициенты линейных трендов максимума частоты плавучести (а) и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ (б).



Рис. 8. Межгодовая изменчивость максимума частоты плавучести (а) и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости BB (в условных единицах) (б) в точке 54° з.д., 62° ю.ш. (красная линия – линейный тренд).



Рис. 9. Межгодовая изменчивость максимума частоты плавучести (а) и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости BB(в условных единицах) (б) в точке 52° з.д., 60° ю.ш. (красная линия – линейный тренд).

стикам. На северо-западе бассейна преобладает тенденция к уменьшению градиента плотности и увеличению вертикальной динамики вод. В югозападной части бассейна наоборот — положительный тренд градиента плотности и отрицательный тренд вертикальной составляющей волновой скорости.

Установлено, что в северо-западной части бассейна линейные тренды глубин залегания максимальных значений градиента плотности и ампли-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

(a) (б) -592.04 1.6 -60 1.2 0.8 0 Широта 0 0.4-61 0 -0.4-0.8-62C -1.20 -1.6 -2.0-63 -53 -49 -55 -51-49 -47 - 55-53-51 -47 Долгота Долгота

Рис. 10. Коэффициенты линейных трендов глубин залегания максимума частоты плавучести (а) и максимума амплитуды вертикальной составляющей скорости ВВ (б).

туды вертикальной составляющей скорости BB положительны, в юго-западной – отрицательны.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Букатов А.Е., Соловей Н.М. Оценка связи вертикальной структуры поля плотности и характеристик внутренних волн с крупномасштабной атмосферной циркуляцией в акваториях Перуанского и Бенгельского апвеллингов// Процессы в геосредах. 2017. № 2(11). С. 485–490.
- Гриценко В.А., Красицкий В.П. Об одном способе расчета дисперсионных соотношений и собственных функций внутренних волн в океане по данным натурных измерений // Океанология. 1982. Т. 22. Вып. 4. С. 546–549.
- 3. Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. и др. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // Исследование земли из космоса. 2014. № 3. С. 41–55. https://doi.org/10.7868/S0205961414030087
- Клепиков А.В., Антипов Н.Н. Особенности формирования и распространения водных масс на шельфе и материковом склоне вокруг Антарктиды // Лед и Снег. 2014.54(4). С. 81–94. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-81-94
- 5. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В. и др. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. https://doi.org/10.7868/S0205961415040053

- Краснобородько О.Ю. Внутренние волны в проливе Брансфилд в феврале 2020 года и их влияние на распределение криля // Труды АтлантНИРО. 2021. Т. 5. № 2 (12). Калининград: АтлантНИРО. С. 81-89.
- 7. Лобовиков П.В., Куркина О.Е., Куркин А.А., Кокоулина М.В. Трансформация бризера внутренних волн первой моды над вертикальным уступом в трехслойной жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 182–193. https://doi.org/10.31857/S0002-3515556182-193
- 8. *Миропольский, Ю.З.,* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 302 с.
- 9. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825. https://doi.org/10.31857/S0030157420050172
- Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Полухин А.А. и др. Мезомасштабная изменчивость океана в северной части моря Уэдделла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 663–679. https://doi.org/10.31857/S0030157420050184
- 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 моряУэдделла) в январе 2020 г. // Труды ВНИРО. 2020. Т. 18. С. 33–51.
- 12. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and Their Properties. 2nd Edition. 2004. https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (Дата обращения: 01.09.2022 г.). (13/1)
- 13. Bukatov A.A., Solovei N.M., Pavlenko E.A. Free short-period internal waves in the Arctic Seas of Russia // Physical

Oceanography, [e-journal. 2021] 28(6). P. 599-611. https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-6-599-611

- 14. Fahrbach E., Beckmann A. Weddell Sea Circulation // Encyclopedia of Ocean Sciences, 1st edition. Elsevier Ltd. 2001. V. 6. P. 3201-3209.
- 15. Gill A.E.Circulation and bottom water production in the Weddell Sea // Deep-Sea Research. 1973. V. 20. № 2. P. 111–140.
- 16. Eagles G., Livermore R.A. Opening history of Powell Basin, Antarctic Peninsula // Marine Geology. 2002. V. 185. P. 195-205.
- 17. Klemas V. Remote sensing of ocean internal waves: An Overview // Journal of Coastal Research. 2012. V. 28(3). P. 540–546. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00156.1

547

18. Mueller R.D., Timmermann R. Weddell Sea Circulation // Encyclopedia of Ocean Sciences. 3rd Edition. 2018. P. 1-7.

https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11631-8

19. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. https://www.ipcc.ch/srocc/ (дата обращения 01.10.2022).

Climate Trend Estimation of the Powell Basin Hydrophysical Characteristics

A. A. Bukatov^a, N. M. Solovei^{a, #}, E. A. Pavlenko^a

^aMarine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia [#]e-mail: nele7@mail.ru

The trend assessment of the dynamic state of the Powell Basin waters in the Weddell Sea was made on the basis of the hydrological data of the 79th cruise of the R/V AkademikMstislavKeldysh (January 16–February 6, 2020) and the World Ocean Database-2018 data for January-February from 1975 to 2020. At each node of the guarter-degree grid, a linear trend was constructed for the calculated values of the maximum buoyancy frequency and the maximum amplitude of the vertical component of the internal wave velocity. It is shown that the southwestern and northwestern parts of the Powell Basin differ significantly in their hydrophysical characteristics. In the northwest of the basin, the linear trend of the maximum buoyancy frequency is negative, the trends of the depths of the maximum values of the Väisälä-Brent frequency and the amplitude of the vertical velocity component are positive. In the southwestern part of the basin, the opposite is true: the trend of the maximum buoyancy frequency is positive, the trends in the depths of the maximum values of the Väisälä-Brunt frequency and the amplitude of the vertical velocity component are negative.

Keywords: Powell basin, Väisälä-Brent frequency, internal waves, vertical velocity component, linear trend

— ФИЗИКА МОРЯ —

УДК 551.466

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД В БАССЕЙНЕ ПАУЭЛЛА В ЯНВАРЕ-ФЕВРАЛЕ 2022

© 2023 г. Р. З. Мухаметьянов^{1, 4}, А. М. Селиверстова¹, Е. Г. Морозов^{1, 2, 4}, *, Д. И. Фрей^{1, 2, 4}, В. А. Кречик^{1, 3}, О. А. Зуев¹

> ¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ²Морской гидрофизический институт, РАН, Севастополь, Россия ³Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия ⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия *e-mail: egmorozov@mail.ru Поступила в редакцию 06.11.2022 г. После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

В январе-феврале 2022 года в антарктической экспедиции на научно-исследовательском судне "Академик Мстислав Келдыш" был выполнен CTD/LADCP разрез с гидрохимическими наблюдениями через бассейн Пауэлла в море Уэдделла. Разрез простирался от Антарктического полуострова до Южных Оркнейских островов, тем самым пересекая круговорот Уэдделла в его северо-западной части. В ходе проведенного разреза были получены новые данные о гидрологической и гидрохимической структуре и динамике вод в этом районе. В работе представлены результаты анализа этих данных, касающиеся структуры круговорота Уэдделла, формирования Антарктической донной воды, а также изменчивости гидрофизических и гидрохимических характеристик вод в бассейне Пауэлла. В структуре круговорота Уэдделла было обнаружено лишь два из трех течений – Антарктическое прибрежное течение и течение Антарктического склонового фронта, скорости в которых составляли 10–15 см/с. Структура вод была характерной для моря Уэдделла, но в слое Теплой глубинной воды зафиксировано изменение в максимуме температуры.

Ключевые слова: бассейн Пауэлла, водные массы, CTD/LADCP разрез, кислород, силикаты DOI: 10.31857/S0030157423040147, EDN: YIGHQE

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Пауэлла расположен на северо-западной окраине моря Уэдделла, которое в свою очередь омывает берега Антарктиды в Атлантическом секторе Южного океана. Северную границу бассейна Пауэлла можно очертить по хребту Саут Скотия (South Scotia Ridge), который простирается от Южных Шетландских островов до Южных Оркнейских островов. К западу от бассейна расположен пролив Брансфилда.

Бассейн Пауэлла играет немаловажную роль в распространении Антарктической донной воды (ААДВ), которая осуществляет вентиляцию абиссали Мирового океана [18, 26]. Образованная в море Уэдделла ААДВ течет в море Скотия через проходы в хребте Саут Скотия и распространяется далее в Атлантический океан. Вынос холодных вод из моря Уэдделла был, в частности, подтвержден в 2020 г. в 79-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш". В одном из четырех проходов хребта Саут Скотия, а именно в проходе Филипп, вынос холодных вод оказался незначительным [7]. Основным же проходом для потока Антарктической донной воды в Атлантику является самый глубокий Оркнейский проход [24, 30].

Бассейн Пауэлла также является связующим звеном между водами моря Уэдделла, пролива Брансфилда и моря Скотия как с точки зрения динамики вод в этом районе и процессов водообмена между указанными акваториями [16, 32], так и с биологической точки зрения. В частности, в этом районе происходит распространение и локализация антарктического криля [9], ценнейшего биоресурса Антарктики и важнейшего звена трофической цепи данной экосистемы. Учитывая вышесказанное, бассейн Пауэлла вполне можно считать весьма важным районом для изучения Антарктики, и, соответственно, проведение океанологических наблюдений представляется необходимым для лучшего понимания происходящих



Рис. 1. Разрез SR04 (в данном случае представлен разрез за 2005 г.) (а) и три разреза, выполненные в бассейне Пауэлла на судах: "Polarstern" (2005 г.) (б); "Polarstern" (1998 г.) (в) и "Nathaniel B. Palmer" (1997 г.) (г).

там процессов, в частности, процесса формирования и распространения ААДВ.

Тем не менее, этому району было уделено меньше внимания, чем в целом морю Уэдделла, в котором исследования во многом затрудняли тяжелые ледовые условия [4]. В бассейне Пауэлла, по данным World Ocean Database 2018 [10], было проведено всего лишь три полноценных СТD-разреза (не считая отдельных станций), а остальные разрезы проводились в других частях моря Уэдделла (самым повторяемым является разрез SR04 от Антарктического полуострова (острова Жуэнвиль) на юго-восток до мыса Капп-Норвегия на континенте). Что же касается бассейна Пауэлла, то два из трех разрезов были проведены почти меридионально (это разрезы, выполненные на судах "Nathaniel B. Palmer" и "Polarstern" в 1997 и 1998 гг. соответственно), а третий, последний, был проведен от Антарктического полуострова до Южно-Оркнейского плато ("Polarstern", 2005 г.). Схема разрезов представлена на рис. 1.

Несмотря на малое количество океанографических разрезов через бассейн Пауэлла, в нем проведены многочисленные мультидисциплинарные исследования [19, 22, 29, 30, 32]. В том числе, исследования выполнялись в январе—февра-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ле 2020 г. в 79-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" [5]. Было выполнено несколько океанографических станций в бассейне Пауэлла. Для продолжения этих исследований в 87-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в феврале 2022 г. был выполнен подробный CTD/LADCP разрез с гидрохимическими наблюдениями через бассейн Пауэлла [6]. Целью данной работы является представление результатов этих исследований и оценка изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик района, которые ранее исследовались в работах [23, 31].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В январе-феврале 2022 г. в экспедиции в Атлантический сектор Южного океана на НИС "Академик Мстислав Келдыш" (НИС "АМК") в 87-м рейсе был выполнен океанографический разрез через бассейн Пауэлла (море Уэдделла) от Антарктического полуострова до Южных Оркнейских островов (подобный тому, что был выполнен на судне "Polarstern" в 2005 г.). Схема расположения станций на разрезах показана на рис. 2.

В 2022 г. на разрезе было выполнено 16 станций, на которых проводилось погружение кассетного пробоотборника General Oceanics 1018 (ро-



Рис. 2. Схема расположения станций на разрезе в бассейне Пауэлла в 87-м рейсе НИС "AMK" (красный цвет, подписаны номера станций, о которых будет упомянуто особо далее по тексту) и станции разреза судна "Polastern" 2005 г. (синий цвет).

зетта) с размещенным на нем оборудованием. Профилирование розеттой проводилось от поверхности до дна. На самой розетте размещалось следующее оборудование: СТD зонд Idronaut Ocean Seven 320Plus и LADCP TRDI WorkHorse Monitor 300 kHz для получения гидрологических данных; альтиметр и пингер для обеспечения безопасного погружения (т.к. профилирование выполнялось почти до самого дна) и батометры для отбора проб воды.

Пробы воды для гидрохимических анализов отбирались пластиковым батометром на станциях, в специально подготовленные стеклянные и пластиковые бутыли в соответствии с ГОСТ Р 51 592-2000, ГОСТ 17.1.5.04-81 и методиками, используемыми для анализа. Пробы для определения растворенного кислорода отбирались через силиконовые шланги со стеклянными трубками, позволявшими контролировать отсутствие пузырька воздуха при заполнении склянок. Растворенный кислород в морской воде анализировался с помощью метода Винклера, модифицированного Карпентером в 1965 г. (микрометод) [12]. Определение растворенного неорганического кремния (силикатов) проводилось по методу Королева [8] с образованием голубого молибденового комплекса.

Для обработки и визуализации СТD- и LADCPданных использовался программный пакет Ocean Data View [28]. Для учета вклада приливных скоростей использовалась региональная модель CATS2008 [27]. На переходах между станциями проводились измерения течений в верхних 600– 800 м при помощи встроенного судового профилографа течений (SADCP), данные от которого также использовались при обработке данных LADCP. Помимо данных, полученных непосредственно в ходе 87 рейса "AMK", были использованы данные из открытой базы данных World Ocean Database 2018 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водные массы

Гидрологическая структура вод на разрезе была следующей: верхний слой занимала Антарктическая поверхностная вода (АПВ); далее шел слой Теплой глубинной воды (как известно, единственная водная масса, поступающая извне в море Уэдделла и именуемая также Циркумполярной глубинной водой); под слоем Теплых глубинных вод (ТГВ) располагались Глубинные воды моря Уэдделла (УГВ) и Донные воды моря Уэдделла (УДВ), которые относят к Антарктической донной воде. Отдельно можно выделить шельфовые воды, которые схожи с АПВ, но при этом являются более холодными и, что важнее, самыми плотными водами. Во время ледообразо-



Рис. 3. Распределение потенциальной температуры на разрезе через бассейн Пауэлла по данным 87 рейса НИС "AMK". В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, в нижней – вся водная толща от поверхности до дна.

вания они становятся еще более плотными за счет осолонения и опускаются на глубину, чтобы стать потом основой будущей ААДВ. При дальнейшем стекании этих экстремально плотных вод по континентальному склону происходит смешение с ТГВ [21, 25], а также с АПВ. В результате смешения всех трех вышеназванных водных масс образуется Антарктическая донная вода.

Слой УГВ обычно выделяют по характеристикам потенциальной температуры от -0.7 до 0°С, и, соответственно, слой УДВ — по изотермам ниже -0.7°С [29, 33].

Донные воды моря Уэдделла на выполненном разрезе занимали глубины более 3000 м. Глубинные воды моря Уэдделла занимали промежуточное положение между УДВ и ТГВ, нижняя граница которой опускалась в центральной части разреза до глубин более 1500 м. Верхняя граница варьировалась вдоль разреза от 150 м в центральной части до 450 м в районе склона (на шельф она, как известно, уже не проникает, по крайней мере, в море Уэдделла, чем и обусловлена возможность образования ААДВ). Такой прогиб изолиний вверх в центре бассейна Пауэлла характерен для циклонической циркуляции, которая, собственно и присутствует в море Уэдделла. Выше слоя ТГВ располагалась АПВ. АПВ занимает поверхностный слой в несколько сотен метров, из которых 50–100 м прогреваются в летнее время, что видно на разрезе (рис. 3).

Под слоем прогретой воды с поверхности располагается холодный подповерхностный слой



Рис. 4. *θ*,*S*-кривые на разрезе через бассейн Пауэлла по данным 87 рейса НИС "АМК".

зимнего выхолаживания. В западной части бассейна Пауэлла он более глубокий из-за выноса холодных вод южной части моря Уэдделла циклоническим круговоротом течений.

Значения температуры в прогретом верхнем слое достигают 1°С в восточной части разреза. Положительные значения температуры, помимо верхнего слоя АПВ, имеют также Теплые глубинные воды (собственно этот подповерхностный слой и выделяют по нулевой изотерме [11]). На нашем разрезе 2022 г. максимум потенциальной температуры в слое ТГВ составлял 0.51°С, что можно видеть по θ ,*S*-кривым (рис. 4).

Максимальные значения температуры в слое Теплой глубиной воды на всех разрезах (как на предыдущих разрезах в бассейне Пауэлла, так и на нашем разрезе) отличаются, но при этом данные предыдущих разрезов ближе между собой (максимум потенциальной температуры составлял 0.66°С в 1997 г., 0.62°С в 1998 г. и 0.74°С в 2005 г.). По данным наших измерений в 79-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в 2020 г. в точке 62°29.0' ю.ш., 50°57.4' з.д. (станция 6654), максимальная потенциальная температура была 0.65°С. По данным нового разреза в 2022 г., максимальная температура достигала всего лишь 0.51°C, что заметно отличается от предыдущих данных. В этом районе нами было проведено еще одно измерение зондом AML до глубины 500 м, которое не было включено в данные на разрезе, чтобы строить

разрез по однородным данным одного прибора. По данным AML в точке 62°20.0' ю.ш., 50°39.0' з.д., максимальная потенциальная температура в слое ТГВ была 0.55°C, что заметно холоднее всех предыдущих измерений. Возможно, наш разрез не пересек ядро самой теплой воды, но скорее максимальные значения температуры в слое ТГВ в бассейне Пауэлла изменяются от года к году в пределах 0.2 от 0.55° до 0.74°С. Мы допускаем, что ядро самой высокой температуры в Теплой воде моря Уэдделла меняет свое пространственное положение с течением времени и отдельные станции выполняются не в точке с максимальной температурой ядра. Максимум температуры находится на глубине около 400 м. На основании наших измерений можно считать, что 2022 год был аномально холодным для Теплой глубинной воды моря Уэдделла в бассейне Пауэлла.

На разрезе температуры, выполненном в 2022 г., обнаруживается слой опресненной воды в районе склона и линза очень холодной воды с температурными характеристиками ниже -1° С (потенциальная температура достигает -1.69° С) (рис. 3). Линза расположена в подповерхностном слое (на глубинах примерно от 50 до 200 м) над склоном. На разрезе солености эта особенность не проявляется (рис. 5), и, как будет показано ниже, ее нет и на разрезе кислорода.

Непосредственно над этой линзой имеется сильно опресненный участок с соленостью ниже



Рис. 5. Разрез солености в бассейне Пауэлла по данным НИС "Академик Мстислав Келдыш" в 2022 г. В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, а в нижней — вся водная толща от поверхности до дна.

34.2 psu. Линза и слой холодной воды образуются за счет зимнего выхолаживания и летнего прогревания поверхностного слоя. Поэтому она не проявляется по соленостным характеристикам. Слой опресненной воды образуется за счет таяния большого количества льда, который выносится из южной части моря Уэдделла. Опреснение льдом может достигать 33.6 psu [20].

На разрезе по СТД-данным, выполненном в 87-м рейсе НИС "АМК", так же, как и на разрезе судна "Polarstern" 2005 г. (рис. 6), не обнаруживается явного стекания вод по континентальному склону вниз.

Известно, что формирование ААДВ за счет такого каскадинга в море Уэдделла происходит по

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

всему краю шельфа к западу примерно от 30° з.д. [17]. На СТD-разрезах от Антарктического полуострова на юго-восток в сторону мыса Капп-Норвегия (мыс Капп-Норвегия расположен в юго-восточной части моря Уэдделла на континенте) опускание плотных вод, как правило, проявляется (рис. 7).

Важным фактором при обнаружении стекания холодной воды с высоким содержанием кислорода по континентальному склону является температура поверхности воды. На разрезе судна "Polarstern" в 2005 г. температура воды на поверхности была –1.44°С. Во время наших измерений в 2022 г. граница льда отступила на юг более чем на 150 км (рис. 8). По данным антарктической экспедиции 2020 г., ледяное поле было встречено на



Рис. 6. Распределение потенциальной температуры на разрезе через бассейн Пауэлла, выполненном в 2005 г. на судне "Polarstern". Стекание плотных вод вдоль континентального склона не проявляется. В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, а в нижней — вся водная толща от поверхности до дна.

62° ю.ш. в бассейне Пауэлла, а на широте 63° уже нельзя было работать. В 2022 г. самая южная станция на разрезе была беспрепятственно выполнена на 63° ю.ш. Самая южная станция экспедиции была на 64°30′ ю.ш. На шельфовых станциях нашего разреза температура верхнего слоя была -0.45°C. Этого недостаточно для обеспечения воды высокой плотности и каскадинга потока вниз по склону.

Распределение скоростей течений на разрезе

Известно, что в акватории моря Уэдделла имеется огромный круговорот циклонической направленности: Weddell Gyre [13]. В северо-западной его части обычно выделяют три основных фронта: Фронт Уэдделла (Weddell Front), Антарктический склоновый фронт (Antarctic Slope Front) и фронт Антарктического прибрежного течения (Antarctic Coastal Current). Фронт Уэдделла обычно связывают с изобатами в 2500–3000 м [32]. Антарктический склоновый фронт ассоциируют с верхней частью материкового склона в районе изобаты 800 м [32], а Антарктическое прибрежное течение не привязано к какой-либо конкретной изобате и локализуется на шельфе [34], за внешнюю границу которого в Антарктике обычно принимают изобату 500 м [4], а сам фронт часто ассоциируют с кромкой льда.

На выполненном в 87-м рейсе НИС "AMK" разрезе через бассейн Пауэлла можно видеть единое течение, охватывающее почти весь шельф и часть склона (рис. 9). Стоит отметить, что скоро-



Рис. 7. Распределение потенциальной температуры (а) и содержания кислорода (б) на разрезе SR04 (представлена только часть разреза от полуострова), выполненном в 2005 г. на судне "Polarstern". Стекание холодных плотных вод вниз по континентальному склону проявляется как по потенциальной температуре, так и по кислороду.

сти подверглись обработке для учета вклада приливных скоростей при помощи региональной модели CATS2008 [27].

Разграничение на Антарктическое прибрежное течение и Антарктический склоновый фронт можно провести по станции 7343, расположенной на бровке шельфа. Скорости в верхней части склона составляют 10-15 см/с. На шельфе скорости составляют те же 10-15 см/с, несмотря на то что, согласно литературным данным, Антарктическое прибрежное течение должно быть менее интенсивным по сравнению с Антарктическим склоновым фронтом [34]. К тому же на шельфе имеется станция (7339), скорости на которой су-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

щественно отличаются от скоростей на остальных станциях, как шельфовых, так и склоновых (рис. 10).

Во всей толще на этой станции скорости не опускались ниже 30 см/с, а максимальные значения достигали 55 см/с. Вероятно, что это всего лишь ошибка региональной модели для оценки скорости прилива. По имеющимся данным невозможно определить, какая из моделей лучше: региональная [27] или глобальная [14]. С другой стороны, диапазон скоростей на этой (7339) станции составляет 25 см/с, то есть даже если бы прилив максимально уменьшил скорости на этой станции, в придонном слое все равно были бы



Рис. 8. Спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а (красные и зеленые тона, мкг/л) по эмпирическому алгоритму OC4 с радиометров OLCI: композит за 17 января 2022 г. Ледовые поля показаны синим цветом южнее 65° ю.ш. Композит составлен П.А. Салюком.

весьма значительные скорости, превосходящие как скорости Антарктического прибрежного течения, так и скорости Антарктического склонового фронта.

Профиль скорости на крайней станции со стороны Южных Оркнейских островов (на шельфе, станция 7370) также несколько выделялся от окружающих станций (рис. 11). В слое нижних 300 м скорости не опускались ниже 15 см/с.

На представленных выше профилях скоростей можно отметить еще две выделяющиеся станции с интересными особенностями, а именно станции 7347 и 7348, расположенные на склоне. На профилях скоростей этих станций можно видеть увеличение скорости в придонном слое относительно всего остального профиля скорости (рис. 11). На станции 7347 в придонном слое скорости достигают 31 см/с, а на станции 7348 они немного меньше (24 см/с). Это может говорить о том, что опускание плотных вод все-таки происходит, но, по всей видимости, не столь интенсивно, как на разрезах от Антарктического полуострова до мыса Капп-Норвегия. Связать не столь интенсивное образование и стекание донных вод можно еще и со временем проведения работ. Ледообразование, которое является своего рода катализатором образования плотных вод, происходит в осеннезимний период, а разрез в бассейне Пауэлла проводился уже в летний сезон.

Что касается фронта Уэдделла, известного по литературным данным, то он не наблюдается по данным LADCP. Возможно, это связано с тем, что переходы между станциями на больших глубинах оказались слишком большими и получившееся разрешение не позволило обнаружить его.

По данным SADCP фронт Уэдделла также не обнаруживается. Распределение скоростей на выполненном разрезе в бассейне Пауэлла по данным судового профилографа течений представлено на рис. 12.

По данным SADCP так же, как и по данным LADCP, обнаруживаются течения на шельфе и склоне со стороны Антарктического полуострова. На склоне, как и на шельфе, скорости составляют 10–15 см/с.

В целом, картины распределения скоростей по данным обоих профилографов неплохо согласуются и тем самым подтверждают друг друга.

Растворенный кислород

Содержание растворенного кислорода на разрезе составляло от 4.75–7.95 мл/л (59–101% насыщения). Наибольшие изменения наблюдались в верхнем 200-м слое на шельфовых станциях разреза и в верхнем 50-м слое на глубоководных станциях. Максимальное содержание растворенного кислорода отмечено на подповерхностных горизонтах станций 7340 и 7342, минимальное – в толще воды 200–1000 м всех склоновых и глубоководных станций разреза от 7347 до 7369 (содержание растворенного кислорода здесь не достигало 5 мл/л) (рис. 13).



Рис. 9. Распределение величины скорости, спроецированной перпендикулярно разрезу, в бассейне Пауэлла в 2022 г. по данным LADCP. В верхней части рисунка на карте показаны осредненные вектора скоростей на станциях. Показан масштаб вектора скорости 50 см/с.

Растворенный кремний

Содержание растворенного кремния на разрезе составляло 53.58–117.74 µМ. Минимальные значения наблюдались в верхних 50 м шельфовых станций 7342–7347 и 7366–7370. Максимальные значения растворенного кремния отмечены в слое вод 700–2500 м (106.53–117.73 µМ) на глубоководных станциях 7359–7366 (рис. 14).

По гидрохимическим параметрам четко выделяются четыре слоя вод, отмеченных на разрезе в 2022 г.: Антарктическая поверхностная вода, Теплая глубинная вода, Глубинные воды и Донные воды моря Уэдделла (табл. 1).

Наибольшая изменчивость наблюдается в слое Антарктической поверхностной воды, она харак-

теризуется низкими значениями растворенного кремния (в среднем - 64.42 µМ) и высокими кислорода (в среднем - 7.32 мл/л при 91% насыщения). Стоит отметить, что толщина этого слоя заметно отличалась на шельфовых и глубоководных станциях: на шельфе АПВ занимала практически всю толщу вод от поверхности до дна и составляла около 200 м, на глубоководных станциях же была значительно тоньше – порядка 50 м, что является следствием циклонической циркуляции вод моря Уэдделла и поднятием Теплых глубинных вод. Слой ТГВ, расположенный под слоем АПВ, до горизонта в 1500 м характеризуется самым низким на разрезе содержанием растворенного кислорода (в среднем 5.04 мл/л при 62% насыщения) и более высоким, по сравнению с АПВ, -



Рис. 10. Профили величины скорости течений, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, на станциях разреза через бассейн Пауэлла. Показаны лишь профили для станций разреза, расположенных на шельфе и склоне Антарктического полуострова.



Рис. 11. Профили величины скорости, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, на станциях разреза через бассейн Пауэлла. Слева (панель а) показаны профили для всех станций разреза, справа (панель б) – отдельно для крайних четырех станций со стороны Южных Оркнейских островов.



Рис. 12. Распределение величины скорости, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, в бассейне Пауэлла в 2022 г. по данным SADCP. Показана только часть разреза от Антарктического полуострова. В верхней части рисунка на карте отмечены осредненные по всей водной толще направления скоростей. Показан масштаб вектора скорости 20 см/с.

растворенного кремния (в среднем – $102.19 \,\mu$ M). Слой УГВ (1500–3000 м) отмечен наибольшими концентрациями растворенного кремния на разрезе – до 114.80 μ M (в среднем – $105.73 \,\mu$ M) и увеличением растворенного кислорода с 5.04 до 5.63 мл/л (при степени насыщения 69%). Ниже 3000 м, в слое УДВ, содержание растворенного кислорода увеличивается до 6 мл/л (степень насыщения – 73%), а кремния – снижается до 92.17 μ M.

выводы

В целом гидрологическая структура вод в бассейне Пауэлла соответствовала имеющимся пред-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ставлениям. Но при этом значения температуры отличались от данных прошлых разрезов. Максимум потенциальной температуры слоя ТГВ составлял 0.51°C, при том, что предыдущие измерения показывали значения от 0.62 до 0.74°C.

На разрезе по температуре был обнаружен подповерхностный опресненный слой и линза холодной воды толщиной примерно 150 м в подповерхностном слое над склоном с минимумом температуры –1.69°С. Эта особенность не проявляется ни по солености, ни по кислороду.

На проведенном разрезе по данным CTD не было обнаружено стекания вод с шельфа по конти-



Рис. 13. Содержание растворенного кислорода (О2, мл/л) и степени насыщения кислородом (О2, %) на разрезе через море Уэдделла.

нентальному склону, но при этом на разрезах скоростей обнаруживаются повышенные скорости в придонном слое на склоне, что может говорить о том, что стекание вод все-таки происходит, но не столь интенсивно, как в осенне-зимний период (или, быть может, потому не столь интенсивно, что это уже пограничная территория, где еще формируются донные воды). Отметим, что во время наших измерений в 2022 г. северная граница плавучих льдов сместилась на юг приблизительно на 100 км и температура поверхностных вод в юго-западной части бассейна Пауэлла была выше нормы.

Известные по литературным данным Антарктическое прибрежное течение и Антарктиче-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 Nº 4 2023



Рис. 14. Распределение растворенного кремния (Si, µM) на разрезе через море Уэдделла.

Водная масса		О ₂ , мл/л	O ₂ , %	Si, µM
АПВ	Среднее	7.32	91	64.42
	Ст. откл.	0.67	9.6	7.68
	Минимум	5.65	69	53.58
	Максимум	7.96	101	83.36
ΤΓΒ	Среднее	5.04	62	102.19
	Ст. откл.	0.25	2.7	8.03
	Минимум	4.75	59	88.05
	Максимум	5.63	69	117.74
УГВ	Среднее	5.63	69	105.73
	Ст. откл.	0.20	2.2	5.03
	Минимум	5.30	66	98.45
	Максимум	5.91	72	114.80
УДВ	Среднее	6.00	73	92.17
	Ст. откл.	0.06	0.6	2.67
	Минимум	5.94	73	90.17
	Максимум	6.06	74	95.20

Таблица 1. Распределение гидрохимических параметров для водных масс моря Уэдделла

Примечание. О₂, мл/л – растворенный кислород, О₂, % – степень насыщения кислородом, Si – силикаты. АПВ – Антарктическая поверхностная вода, ТГВ – Теплая глубинная вода моря Уэдделла, УГВ – Глубинная вода моря Уэдделла, УДВ – Донная вода моря Уэдделла.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ский склоновый фронт наблюдались на шельфе и верхней части склона соответственно. Интенсивность обоих течений была одинакова, несмотря на то, что, согласно литературным данным, Антарктическое прибрежное течение должно быть менее интенсивным. Скорости в обоих течениях составляли 10–15 см/с как по данным погружного, так и по данным бортового профилографа течений.

Фронт Уэдделла, также известный по литературным данным по повышенным скоростям течений, не удалось обнаружить ни по данным погружного, ни по данным судового профилографа течений. Можно предположить, что в районе наших работ он сливается со склоновым течением.

Распределение гидрохимических параметров хорошо отражает термохалинную структуру вод. По распределению растворенного кислорода и кремния, как и по распределению температуры и солености четко выделяются границы водных масс, присутствующих на разрезе. Данные, полученные нами в ходе экспедиции в феврале 2022 года, согласуются с литературными [1, 2, 3, 15, 31].

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002 (сбор и обработка натурных данных) и при поддержке гранта РНФ 21-77-20004 (анализ данных измерений и баз данных и интерпретация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанова Н.В. Гидрохимические показатели фронтальных зон в Южной Атлантике // Изд-во ВНИРО. 1990. Т. 2. С. 12–20.
- 2. Артамонова К.В., Гангнус И.А., Масленников В.В., Торгунова Н.И. Гидрохимические исследования в водах Антарктики в 59-й Российской Антарктической экспедиции // Океанология. 2015. Т. 55. № 5. С. 866–866.
- 3. Батрак (Артамонова) К.В. Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 349–356.
- Клепиков В.В. Гидрология моря Уэдделла // Труды Сов. Антарктической Экспедиции 1963. Т. 17. С. 45–93.
- Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825. https://doi.org/10.31857/S0030157420050172
- 6. *Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др.* Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825–827.

https://doi.org/10.31857/S003015742205015X

- 7. *Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Тараканов Р.Ю.* Поток Антарктической донной воды через восточную часть прохода Филип в море Уэдделла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 680–684.
- Современные методы гидрохимических исследований океана. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. (ред.). М.: ИОАН СССР, 1992. 198 с.
- 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.
- Boyer T.P., Baranova O.K., Coleman C. et al. World Ocean Database 2018. A.V. Mishonov, Technical Editor. NOAA Atlas NESDIS 87.
- Carmack E.C., Foster T.D. On the flow of water out of the Weddell Sea // Deep-Sea Research. 1975. V. 22. P. 711–724.
- Carpenter J.H. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method // Limnol. Oceanogr. 1965. V. 10. P. 141–143.
- Deacon G.E.R. The Weddell gyre // Deep Sea Res. Part I. 1979. V. 26 (9). P. 981–995.
- 14. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
- 15. *Fedotova A.A., Stepanova S.V.* Water mass transformation in the Powell Basin // In: "Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecolo-

gy", E.G. Morozov et al. (eds.). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_11. ISBN 978-3-030-78927-5

- Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water exchange between deep basins of the Bransfield Strait // Water 2022. V. 14. P. 3193. https://doi.org/10.3390/w14203193
- Gill A.E. Circulation and bottom water formation in the Weddell Sea // Deep-Sea Research. 1973. V. 20. P. 111–140.
- Gordon A.L., Visbeck M., Huber B. Export of Weddell Sea deep and bottom water // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № C5. P. 9005–9018.
- Heywood K.J., Garabato A.C.N., Stevens D.P., Muench R.D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C06021. https://doi.org/10.1029/2003JC002053

20. *Izhitskiy A., Romanova N., Vorobieva O., Frey D.* Impact of ice melting on oceanographic and hydrobiological characteristics of surface waters in the Powell Basin, Weddell Sea, in January–February 2020 // Oceanolo-

gy. 2022. V. 62. P. 439-446.

- 21. *Klatt O., Fahrbach E., Hoppema M., Rohardt G.* The transport of the Weddell Gyre across the Prime Meridian // Deep-Sea Res. Part II. 2005. V. 52 (3–4). P. 513–528.
- Meijers A.J.S., Meredith M.P., Abrahamsen E.P. et al. Wind driven export of Weddell Sea slope water // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. V. 121. P. 7530–7546. https://doi.org/10.1002/2016JC011757
- Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A. et al. Water masses, currents, and phytoplankton in the Bransfield Strait in January 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology. Springer, 2021.V. 6. P. 55–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5
- Morozov E.G., Frey D.I., Zuev O.A. et al. Hydraulically controlled bottom flow in the Orkney Passage // Water MDPI. 2022. V. 14 (19). P. 3088. Doi: https://doi.org/10.3390/w14193088
- Orsi A.H., Nowlin W.D., Whitworth T. III. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // Deep-Sea Research, Part I. 1993. V. 40. P. 169–203.
- Orsi A.H., Smethie W.M., Bullister J.L. On the total input of Antarctic Waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements // J. Geophys. Res. 2002. 107(C8). 3122. https://doi.org/10.1029/2001JC000976
- 27. *Padman L., Erofeeva S.Y., Fricker H.A.* Improving Antarctic tide models by assimilation of ICESat laser altimetry over ice shelves // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L22504.

https://doi.org/10.1029/2008GL035592

 Schlitzer R. Data analysis and visualization with Ocean Data View // CMOS Bulletin SCMO. 2015. V. 43. № 1. P. 9–13.

2023

563

- 29. Schröder M, Hellmer H.H., Absy J.M. On the near-bottom variability in the northwestern Weddell Sea // Deep-Sea Res. Part II. 2002. V. 49. P. 4767–4790.
- Schodlok M., Hellmer H., Beckmann A. On the transport, variability and origin of dense water masses crossing the South Scotia Ridge // Deep-Sea Res. Part II. 2002. V. 49. P. 4807-4825. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00160-1
- Stepanova S.V., Polukhin A.A., Borisenko G.V. et al. Hydrochemical structure of waters in the Northern Weddell Sea in Austral Summer 2020 // In: "Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology", E.G. Morozov et al. (eds.), Springer, 2021. V. 6. P. 159–174.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_11. ISBN 978-3-030-78927-5

- Thompson F., Heywood K. Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // Deep-Sea Research Part I. 2008. V. 55. P. 1229–1251.
- 33. Wang Q., Danilov S., Fahrbach E. et al. On the impact of wind forcing on the seasonal variability of Weddell Sea Bottom Water transport // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L06603. https://doi.org/10.1029/2012GL051198
- Youngs M.K., Thompson A.F., Flexas M.M., Heywood K.G. Weddell Sea export pathways from surface drifters // J. Phys. Oceanogr. 2015. V. 45 (4). P. 1068–1085. https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0103.1

Hydrological Structure and Water Dynamics in the Powell Basin in January–February 2022

R. Z. Mukhametianov^{a, d}, A. M. Seliverstova^a, E. G. Morozov^{a, b, d, #}, D. I. Frey^{a, b, d}, V. A. Krechik^{a, c}, O. A. Zuev^a

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ^bMarine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 ^cImmanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
 ^dMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia
 [#]e-mail: egmorozov@mail.ru

In January–February 2022, a CTD/LADCP section across the Powell Basin in the Weddell Sea with hydrochemical observations was carried out in the Antarctic expedition of the R/V "*Akademik Mstislav Keldysh*". Transect was located from the Antarctic Peninsula to the South Orkney Islands; thus, it crossed the Weddell Gyre in its northwestern part. As a result, we collected new data about hydrological structure and water dynamics in this area. In this study, we present new results on the data analysis related to the structure of the Weddell Gyre, Antarctic Bottom Water formation, as well as variability of hydrophysical and hydrochemical characteristics of waters in the Powell Basin. Only two of the three currents, Antarctic Coastal Current and Antarctic Slope Front, were identified in the structure of the Weddell Gyre. Velocities of these currents were about 10–15 cm/s. The structure of waters was typical for the Weddell Sea, but a change in the temperature maximum was recorded in the layer of Warm Deep Water.

Keywords: Powell Basin, water masses, CTD/LADCP section, oxygen, silicates

——— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.465

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В РАЙОНЕ ОСТРОВА ХАФ-МУН, ЮЖНЫЕ ШЕТЛАНДСКИЕ ОСТРОВА

© 2023 г. О. С. Мехова^{1, 2}, Д. А. Смирнова^{1, 3}, Е. Г. Морозов^{1, 4, *}, С. А. Остроумова^{1, 5}, Д. И. Фрей^{1, 4, 6}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ²Санкт-Петербургский государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия ³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия ⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. область, Россия ⁵Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия ⁶Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия ^{*}e-mail: egmorozov@mail.ru Поступила в редакцию 16.10.2022 г. После доработки 05.12.2022 г. Принята к публикации 15.02.2023 г.

В работе анализируются внутренние волны на основе измерений в 87-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в проливе Брансфилда у острова Хаф-Мун и расчетов по численной модели. Измерения проводились 25 января 2022 г. в течение четырех часов с помощью термокосы, оснащенной датчиками температуры и давления, параллельно с измерениями СТD-зондом. Колебания температуры по датчикам термокосы и зонда показали, что амплитуда внутренних волн близка к 5 м, иногда достигая 15 м. По результатам расчетов глобальной приливной модели ТРХО9, в районе работ преобладают неправильные полусуточные приливы. Численные расчеты параметров внутренних волн показывают, что бароклинный прилив, сгенерированный на крутом склоне, распадается на более высокочастотные волны.

Ключевые слова: внутренние волны, пролив Брансфилда, модельный расчет, спектры **DOI:** 10.31857/S003015742304010X, **EDN:** YISXGY

1. ВВЕДЕНИЕ

Пролив Брансфилда – это пролив в Южном океане к северо-западу от Антарктического полуострова, разделяющий его с Южными Шетландскими островами. Несмотря на труднодоступность района, за последние несколько десятилетий были проведены многосторонние исследования в проливе: термохалинная структура водных масс [9, 13, 28, 29] и их циркуляция [8, 27, 30], геология [3, 19], гидротермальные источники [17], осадконакопление [32], биопродуктивность [15]. Эти исследования охватили большой спектр вопросов, касающихся происхождения пролива, его эволюции и современного гидрологического режима, однако до сих пор остаются дискуссионные вопросы, требующие валидации с помощью натурных данных. К ним относится, например, задача численного моделирования различных параметров в полярных областях, осложняющаяся наличием ледового покрова и малым количеством данных из-за труднодоступности регионов. В данной работе речь пойдет о сравнении натурных данных и результатов численного моделирования

внутренних волн в проливе Брансфилда. Подобные исследования ранее проводились в проливе [16], но в более глубоководной его части.

Внутренние волны образуются во всем Мировом океане. Они возникают в стратифицированном океане чаще всего под влиянием поверхностных волн или баротропных приливов [4, 11, 12, 21]. Набегание приливного течения на подводный склон или возвышенность может порождать волны высотой до сотен метров [10, 14]. В проливах генерация внутренних волн интенсифицируется, поскольку вынуждающая сила (скорость приливных течений) усиливается в узостях по сравнению с открытым океаном [5, 22, 23, 31]. Помимо пролива Брансфилда изучение внутренних волн в высокоширотных районах проводилось также в районе Шпицбергена [23], Карских Воротах [22, 24, 25], в арктических морях России [18, 26] и в Южном океане [1].

Цель настоящего исследования заключается в выделении внутренних волн в центральной части пролива Брансфилда между Южными Шетландскими островами, где глубины составляют 30–34 м,



Рис. 1. Район работ на станции 7312 87 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш". Топография представлена по данным GEBCO2022. На врезке показана карта Антарктики и район измерений (красная точка).

по натурным данным и результатам численного моделирования в период квадратурных приливов во время подъема уровня и фазы полной воды. но тестовое измерение длительностью 4 мин, после чего были выполнены два отдельных часовых профилирования.

2. ДАННЫЕ

Работы по исследованию внутренних волн проводились в проливе Брансфилда у острова Хаф-Мун на станции 7312 25 января 2022 г. (рис. 1) Измерения выполнялись одновременно двумя приборами: термокосой и СТД-зондом AML Base X. Работы проводились с 10:47 до 14:54 GMT.

Термокоса состояла из семи датчиков температуры Starmon mini фирмы StarOddi, распределенных по фалу на расстоянии от 2 до 5 м друг от друга, одного датчика температуры и давления DST milli-T/TD фирмы StarOddi, груза, элемента плавучести. Дискретность измерений составляла 5 с. Схема термокосы показана на рис. 2. Измерения проводились в течение 2 ч с 12:15 GMT. Более точные датчики Starmon mini T рассчитаны на диапазон температур от -2 до $+40^{\circ}$ C. Точность измерений этих датчиков лучше ±0.05°C, разрешение составляет 0.013°С. Точность записи времени — ±1 мин для месяца измерений. Датчики DST milli-T/TD, помимо температуры, позволяют измерять и давление. Они работают в температурном диапазоне от -1 до $+40^{\circ}$ С. Их точность составляет $\pm 0.2^{\circ}$ С, а разрешение — 0.032° С. Давление измеряется с точностью до $\pm 0.5\%$ от измеряемого диапазона.

Измерения СТД-зондом выполнялись с помощью лебедки до глубин 30—34 м. Среднее время одного зондирования составляло 2 мин. Проведе-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 2. Схема измерений термокосой с борта судна на якоре 25 января 2020 г. на станции 7312 (62°35.4' ю.ш., 59°53.9' з.д.). Серым цветом обозначены датчики Starmon mini T, голубым — датчик DST milli-T/TD.



Рис. 3. Изменчивость вертикального распределения потенциальной температуры (a, б) и солености (в, г) за время первого часового профилирования (б, г), выполненных CTD-зондом AML Base X на станции 7312. По оси *x* дано время в минутах с начала измерений. Пунктиром показаны изолинии аномальной плотности в кг/м³. Положение зонда по глубине в зависимости от времени показано точками. Время начала первого часового профилирования – 11:24, время начала второго профилирования – 13:49.

Далее в тексте вместо терминов "потенциальная температура" и "аномальная плотность" будут использоваться "температура" и "плотность" соответственно.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ

На рис. 3 и 4 показаны изменения температуры и солености во время часовых измерений. Температура за время первого профилирования изменялась с глубиной от 1.46 до 1.74°С, соленость – от 33.93 PSU до 34.11 PSU. В верхнем слое глубиной до 5 м с 37 по 42 мин с начала измерения происходит увеличение температуры воды с 1.6°С до 1.7°С. Одновременно с этим наблюдается падение солености с 34.05 PSU до 33.97 PSU.

Второе профилирование проводилось через полтора часа после окончания первого и не показало значительного изменения термохалинной структуры. Температура изменялась от 1.4 до 1.7°С, соленость при этом оставалась прежней. На обоих рисунках изопикны соответствуют изолиниям температуры и солености. Это говорит о равном вкладе этих показателей в изменение плотности. При совмещении графиков температуры, полученных CTD-зондом AML Base X и датчиками термокосы, видно, что положения изотерм совпадают, но абсолютные значения различаются на 0.05° C (рис. 4).

Колебания температуры по датчикам термокосы и зонда AML показывают, что высота внутренних волн близка к 5 м. Однако в отдельные периоды времени высота смещений изотерм и изогалин увеличивалась до 15 м.

По данным модели ТРХО9 [6, 7], неправильные полусуточные приливы в районе работ в период сизигии имеют амплитуду около 1 м (рис. 5). Измерения проводились во время квадратурных (минимальных) приливов, когда амплитуда составляла менее 0.5 м (рис. 6).

Натурные данные получены в фазу прилива. Конец измерений приходится на период полной воды. Иными словами, во время измерения скорость приливных течений уменьшается с 10 см/с (11:00 25.01.2022 г.) до 1.5 см/с (15:00 25.01.2022 г.). За 4 часа работ направление приливного течения сменилось с СВ на ЮЗ. Данные по приливному режиму в районе работ получены по баротропной модели ТРХО9 по 15 гармоникам.

Вертикальное распределение частоты Вяйсяля-Брента является характеристикой стратифи-



20 1.55 30 15 Глубина, м epmokoca 10 1.40 1.45 1.50 1.55 1.60 1.65 1.70 20 Потенциальная температура, °С 30 12:44 120 140 160 180 200 220 240

Рис. 4. Совмещенный график изменения температуры на станции 7312 по данным CTD-зонда AML Base X и датчикам термокосы 25.01.2022. По оси *х* дано время в минутах. Начало верхней и нижней осей соответствует времени 10:47 (начало первого тестового зондирования). По оси *у* дана глубина зондирования в метрах.



Рис. 5. Приливные колебания уровня, рассчитанные для станции 7312 на 20 дней, начиная с 00:00 15-го января 2022 г.

кации района работ. Профиль частоты Вяйсяля-Брента показан на рис. 7. Слой скачка плотности расположен на глубине 5–6 м.

20

0

10 - 1-6

16

Плубина, м

40

60

Спектры колебаний температуры на всех горизонтах измерений представляются схожими без хорошо выраженных пиков. Наблюдается спадание к высоким частотам. Измерения в течение двух часов позволили анализировать лишь высокочастотную часть спектра с периодами от 10–12 мин и меньше. Спектры представлены на рис. 8.

Представляется, что в этом районе набегание прилива на склон острова является наиболее сильным генератором внутренних волн. Несмотря на то, что модель Гарретта-Манка не работает в верхнем слое океана, мы, тем не менее, сравним спектры с модельными. Для этого пересчитаем температурные флуктуации в колебания вертикальных смещений частиц воды. Сначала вычтем среднее за ряд наблюдений и затем поделим значения флуктуаций температуры на вертикальный градиент температуры. По ряду вертикальных смещений на глубине 11 м рассчитаем спектр колебаний вертикальных смещений, который показан на рис. 9. Частота плавучести на этом горизонте — 5.396 × 10⁻³ цикл/с.

Как и следовало ожидать, за счет большего поступления энергии от прилива и ветра в верхнем слое океана реальный спектр оказался почти на порядок выше, чем модельный спектр Гарретта-Манка.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 6. Приливные колебания с 23 по 27 января 2022 г., рассчитанные для станции 7312. Голубым цветом выделен период проведения работ.

На рис. 10 показан маршрут судна к точке измерений и рельеф дна. Измерения на якоре проводились примерно в километре от резкого свала глубин от вершины горы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И МОДЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

Внутренние волны приливного периода генерируются в районе подводных склонов за счет того, что течения баротропного прилива набегают на склон и вызывают вертикальные смещения



Рис. 7. Средний профиль частоты плавучести по данным CTD-зондирований.

изолиний плотности. При определенных критических условиях приливные внутренние волны (обычно с периодом 12.4 ч) большой амплитуды частично распадаются на цуги более короткопериодных волн. Эти волны часто бывают высокой интенсивности и распространяются в виде цугов. Цуги короткопериодных внутренних волн генерируются с периодичностью, близкой к 12.4 ч. Цуги распространяются от свала глубин в сторону берега и в открытый океан.

Над свалом глубин пикноклин подвержен значительным вертикальным смещениям в районах, где амплитуды баротропного прилива велики. Над неровным дном течения баротропного прилива приобретают вертикальную составляющую, что приводит к вертикальным смещениям положения пикноклина. Периодические смещения пикноклина вниз и вверх относительно среднего положения приводят к образованию прогрессивных внутренних волн, которые распространяются в обе стороны от склона.

В данной работе мы попытаемся оценить интенсивность короткопериодных внутренних волн, используя численную модель генерации, распространения и диссипации внутренних волн. Скорость течений баротропного прилива рассчитывалась по высоте возвышения уровня по модели Орегонского университета [7] и измерений высоты прилива на побережье. Для расчетов было принято, что высота прилива у берега составляет 0.5 м. Амплитуды течений баротропного прилива оценивались как 10 см/с. Характеристика топографии дна и профили свала глубин в направлении, перпендикулярном берегу, были получены по данным прямых эхолотных измерений при



Рис. 8. Энергетические спектры колебаний температуры на 6 горизонтах измерений.

подходе судна к якорной стоянке. Стратификация океана (невозмущенное состояние) принималась по данным СТD-измерений на якоре. Считается, что из открытого океана на материковый склон набегает баротропная приливная волна. За счет взаимодействия с крупными неоднородностями дна океана на континентальном склоне баротропный прилив получает вертикальные составляющие, и это приводит к генерации бароклинных возмущений. Постановка задачи сводится к определению поля генерируемых внутренних волн по известным параметрам стратификации, рельефа дна и скорости баротропного потока в приливе.

Численная модель [2] построена на основе полных уравнений гидродинамики, учитывающих нелинейность волнового процесса, а также турбулентный обмен и диффузию плотности. Рассматривается двумерный (*x*, *z*) поток в непрерывно стратифицированном вращающемся океане переменной глубины. Для учета вращения вво-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

дится третья координата, однако изменчивость вдоль этой координаты не рассматривается. Используется правая система координат с осью 0x, направленной от берега, осью 0y – вдоль берега и осью 0z – вертикально вверх. Мы пренебрегаем градиентами глубины вдоль склона. Система уравнений движения, описывающая динамику стратифицированной жидкости на *f*-плоскости, сводится к уравнениям для функции тока $\Psi(\Psi_z = U, \Psi_x = -W)$ и вихря $\Omega = (\Psi_{xx} + \Psi_{zz})$. Внутренние волны описываются следующей системой уравнений:

$$\Omega_{t} + J(\Omega, \Psi) - fV_{z} = \frac{g\rho_{x}}{\rho_{0}} + K\Omega_{xx} + K(z)\Omega_{zz} + (K(z)\Psi_{zz})_{z} + (K(z))_{z}\Omega_{z},$$

$$V_{t} + J(V, \Psi) + f\Psi_{z} = KV_{xx} + (K(z)V_{z})_{z}, \qquad (1)$$

$$\rho_{t} + J(\rho, \Psi) + \frac{\rho_{0}N^{2}(z)}{g}\Psi_{x} = R\rho_{xx} + (R(z)\rho_{z})_{z} + (R(z)\rho_{0})_{z},$$



Рис. 9. Спектр вертикальных смещений на горизонте 11 м (черная линия) и модельный спектр Гарретта-Манка (красная линия).

где (U, V, W) – вектор скорости, N – частота Вяйсяля-Брента, ρ – возмущение плотности за счет волнового движения, ρ_0 – средняя плотность, f – параметр Кориолиса, K(z), K, R(z), R – вертикальные и горизонтальные коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии плотности, J – якобиан, g – ускорение силы тяжести. Вместо уравнений диффузии тепла и соли и уравнения состояния используется уравнение диффузии плотности.

Мы рассматриваем только бароклинный отклик океана на воздействие баротропного прилива и принимаем условие "твердой крышки" на поверхности. Возмущения поверхности мы отождествляем с возмущениями самой верхней изолинии плотности в верхнем слое модели. Граничными условиями на поверхности при z = 0являются: $\rho_{z} = 0, \Omega = 0, \Psi = 0$. Равенство нулю завихренности означает отсутствие касательных напряжений на свободной поверхности, а равенство нулю функции тока означает отсутствие вертикальных движений жидкости при z = 0. Условие равенства нулю изменений плотности по вертикали на поверхности океана вытекает из предположения, что потоки тепла и соли через поверхность океана отсутствуют. Это условие означает пренебрежение осадками, испарением и ледообразованием для внутренневолновых процессов.

Замена граничных условий на возмущенной поверхности z = (x, t) условиями при z = 0 равносильна замене набегающей приливной баротропной волны периодическим по времени и постоянным по глубине потоком жидкости или бездивергентной приливной волной. При длине набегающей приливной волны баротропного прилива, превышающей ширину подводного препятствия во много раз, такое допущение не вносит заметной погрешности в амплитуды бароклинных волн.

На дне задается отсутствие потока тепла и соли и непротекание через дно: $z = -H(x), \partial \rho / \partial n = 0$, $\Psi = \Psi_0 \sin \omega t$, где ω – приливная частота, n – нормаль ко дну, Ψ_0 – амплитуда потока массы в приливном течении баротропного прилива. Граничное значение завихренности на дне вычисляется при помощи уравнения $\omega = \Delta \Psi$ с использованием значения поля Ψ на предыдущем временно́м шаге.

На боковых границах, расположенных далеко от неровностей топографии, волновые возмущения завихренности, функции тока и плотности предполагаются нулевыми. Расчет ведется некоторое время и потом прекращается, когда волновые возмущения достигают боковых границ. Фазовая скорость возмущений не превышает 2–3 м/с. Поэтому волновые возмущения долго идут до границ, и это дает возможность выполнить большое количество шагов по времени. Если этого оказывается недостаточно, то в новом расчете боковые границы надо отвести на еще большее расстояние. Расчеты начинались из состояния покоя, когда жидкость на дне не движется и изопикны горизонтальны.

Баротропный прилив деформирует изопикнические поверхности над неровностью дна и генерирует внутренние волны, распространяющиеся в обе стороны от источника возмущений. Если отнести боковые границы области на достаточно далекое расстояние, так чтобы передний фронт внутренней волны достигал боковых границ не раньше, чем после нескольких периодов приливного цикла, то в окрестности неоднородного рельефа дна за это время установится квазипериодический режим движения, который можно интерпретировать как установившийся волновой режим колебаний.

Ставится задача: на основе полных уравнений гидродинамики, учитывающих нелинейность волнового процесса, а также турбулентный обмен, построить математическую модель генерации бароклинного прилива для устойчивой реальной вертикальной стратификации жидкости в районе якорной стоянки. Задается невозмущенное внутренними волнами поле плотности, которому соответствует распределение частоты Вяйсяля-Брента N(z). Из открытой части моря на материковый



Рис. 10. Маршрут судна (красная линия) (а) и профиль рельефа дна океана на подходе к точке работ (б). Топография на панели (а) представлена по данным GEBCO2022, на панели (б) – по данным промера судового эхолота.

склон набегает длинная приливная баротропная волна. Приливные течения, вызываемые этой волной, встречая на своем пути препятствие в виде материкового склона, получают вертикальные составляющие. Периодически изменяемые вертикальные составляющие течений вызывают вертикальные колебания изопикнических поверхностей, и за счет этого механизма возбуждаются внутренние волны приливного периода. Таким образом, по заданным параметрам возбужда-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 11. Генерация волн над склоном и вершиной горы по модельному расчету: вся модельная область (а) и верхний слой (б). Плотность на поверхности задана величиной 27.23 кг/м³. Изолинии плотности проведены с интервалом 0.02 кг/м³.

ющей волны, стратификации и рельефа решается задача расчета параметров бароклинных волновых возмущений. Расчеты по численной модели позволяют оценить амплитуду внутренних волн и потоки их энергии в непосредственной близости от района генерации.

Движения частиц воды, вызываемые внутренними волнами. происходят вдоль характеристических линий. Вдоль этих же линий направлен и вектор групповой скорости. Характеристические линии проходят от поверхности до дна, отражаясь от поверхности и от дна. Одно полное расстояния по горизонтали между двумя касаниями дна или поверхности соответствует масштабу длины внутренней волны. При генерации ансамбля внутренних возмущений от неровностей топографии отходят пучки характеристических линий. При большом количестве источников возмущений на неровном склоне возбуждается целый ансамбль таких лучевых возмущений. Вертикальные компоненты волновых векторов возмушений, распространяющихся вниз и вверх, компенсируют друг друга. Таким образом, формируется стоячая волна по вертикали, или мода. Очевидно, что чем больше поток массы, переносимой течениями баротропного прилива через сечение, перпендикулярное берегу, тем больше амплитуды внутреннего прилива.

Расчеты, проведенные по численной модели, показывают, что обычные уклоны дна, характерные для исследуемого района, могут приводить к возбуждению интенсивного внутреннего прилива относительно большой амплитуды. Поскольку как стратификация, так и локальные наклоны дна имеют нерегулярную структуру, то поле вынужденных внутренних волн должно иметь такую же пятнистую структуру. При этом максимальные амплитуды будут наблюдаться там, где случайным образом будут складываться совпадения наклона характеристических кривых для внутренних приливных волн и наклона дна.

Для проведения расчетов по модели было выбрано рабочее поле протяженностью 48 км с шагом по горизонтали, равным 67 м, и 20 уровнями по вертикали. Рабочее поле (48 км) было выбрано, чтобы избежать влияния краевых эффектов на колебания изопикнических поверхностей около склона. Ширина относительно плоской вершины горы — около 1 км, глубина вершины горы — 50 м, а глубина океана в проливе – около 500 м. Шаг по времени равнялся 11 с. Такие значения вполне удовлетворяют условию Куранта-Фридрихса для устойчивой работы численной модели. Коэффициенты горизонтальной вихревой вязкости и диффузии плотности задавались равными 0.004 м²/с, а соответствующие коэффициенты по вертикали равнялись 0.0001 м²/с. При таких коэффициентах обмена численная задача решалась на грани устойчивости. Меньшие значения приводили к численной неустойчивости за счет возникновения сильных нелинейностей волн при больших амплитудах, а при больших значениях коэффициентов волновое движение происходило в чрезмерно вязкой среде, что уменьшало интересующие нас нелинейные эффекты распространения внутренних волн над шельфом.

Расчеты по модели показали, что если начинать расчеты из невозмущенного состояния океа-



Рис. 12. Модельный расчет колебаний изопикн и распространения возмущений. Показаны два состояния поля плотности с интервалом 30 мин: красная и синяя линии. Изображен участок, где проводились измерения примерно в 1 км от свала глубин.

на, то для получения поля плотности, соответствующего картине развитого волнового движения, достаточно проводить вычисления в течение физического времени, соответствующего 8-10 периодам полусуточной внутренней волны. После этого расчетное поле волны будет эволюционировать соответственно движениям, вызываемым прохождением внутренней волны над заданной топографией дна океана. При этом изменения стратификации будут вызываться внутренневолновыми движениями. Таким образом, можно проследить генерацию внутренней волны над континентальным склоном и распространение двух волн, одна из которых направлена в сторону берега, а другая — в открытый океан. По мере распространения волн они будут затухать за счет турбулентной вязкости воды.

Расчетное поле плотностей после шести приливных периодов расчета по модели показано на рис. 11а. Верхний слой модельного расчета в большем масштабе показан на рис. 11б. Плотность на поверхности задана величиной 27.23 кг/м³. Изолинии плотности проведены с интервалом 0.02 кг/м³. Уже в момент начала образования возмущения вертикальные смещения вблизи верхней части крутого склона превышают 5 м. По мере распространения волн на плоскую вершину горы амплитуда возмущений затухает.

Для волны, распространяющейся в сторону подводной горы, возникает эффект постоянной подкачки волновой энергии (на плоскую вершину горы), который может конкурировать на определенном участке шельфа с диссипацией энергии и приводить к интенсификации волн. Поскольку постоянная подкачка энергии производится в область малых глубин, это приводит к увеличению амплитуды волны со значительной нелинейностью. В определенные моменты времени рост энергии волны приведет к критическим условиям, что вызовет обрушение волны и передачу энергии пакету короткопериодных внутренних волн, которые первоначально будут следовать в одном пакете с породившей их внутренней волной большой амплитуды на ее заднем фронте, а потом будут немного отставать, растягивая пакет в пространстве. При этом короткопериодные волны высокой частоты и меньшей амплитуды будут быстрее затухать, чем исходная волна. Исходная волна в силу значительной нелинейности будет иметь форму импульса.

Рассмотрим модельное распространение волны. На рис. 12 показаны колебания изолиний плотности с интервалом 30 мин. Поле плотностей по модельным расчетам показано красными и синими линиями. Для конкретности более подробно рассмотрим изопикну 27.64 кг/м³, которая совершает колебания примерно в диапазоне глубин 26–28 м. Длина волны оценивается как 1.15 км. За 30 мин волна проходит около 240 м (разница между максимумами красной и синей линий). Фазовая скорость волны по модели оценена как 0.113 м/с. Период волны оценен как 2.8 ч.

Модельная частота Вяйсяля-Брента задавалась как 0.008 цикл/с. Тогда скорость волны можно рассчитать по формуле

$$c=\frac{NH}{\pi n},$$

где c — фазовая скорость волны, N — частота Вяйсяля-Брента, H — глубина места, n — номер моды. Согласно расчету по формуле c = 0.128 м/с, или около 500 м/ч для первой моды. По-видимому, модель показывает преобладание первой моды. Волны с преобладающим периодом около 3 часов распространяются от крутого склона острова Хаф-Мун в сторону мелкой воды на плоской вершине горы. Поскольку модель дает средние численные характеристики волнения, то экстремальные высоты волн, которые были измерены в натурных условиях, моделью не воспроизводятся.

5. ВЫВОДЫ

25 января 2022 г. в районе острова Хаф-Мун в проливе Брансфилда было проведено комплексное изучение внутренних волн, образующихся на полводном склоне под влиянием баротропных приливов. Работа состояла из двух основных блоков: получение натурных данных во время экспедиции на НИС "Академик Мстислав Келдыш" с помошью многократного зонлирования на якорной стоянке и установленной в это же время термокосы и численное моделирование внутренних волн. Сравнение ланных о температуре волы, полученных разными приборами, показало их хорошее соответствие, однако абсолютные значения температуры по зонду AML BaseX превышали показания по датчикам термокосы на 0.05°С. Измерения проводились во время прилива с окончанием в период полной воды. Был проведен спектральный анализ температурных колебаний по двухчасовым рядам, который позволил выделить колебания с периодом 10-12 минут и меньше. Энергетический спектр, построенный на основе расчетов по модели Гарретта-Манка, оказался на порядок ниже, чем спектр по натурным данным. что еше раз доказывает неприменимость этой модели для верхнего слоя океана. По результатам комплексного анализа данных, полученных в районе острова Хаф-Мун, были выделены внутренние волны высотой около 5 м с периодическим увеличением до 15 м. Расчет колебаний изотерм по численной модели позволил приблизительно оценить фазовую скорость волн как 400 м/ч.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках госзадания № FMWE-2021-0002 (судовые расходы и подготовка оборудования) и при поддержке гранта РНФ № 22-77-10004 (анализ натурных данных и моделирование внутренних волн).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бакуева Я.И., Козлов И.Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в Южном океане по данным спутниковых PCA Sentinel 1A/B // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 201–211. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-201-211
- 2. Власенко В.И. Нелинейная модель генерации бароклинных приливов над протяженными неоднородностями рельефа дна // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 6. С. 9–16. Physical Oceanography (Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal). 1992. V. 3. P. 417–424.
- 3. Ashcroft W. Crustal structure of the South Shetland Islands and Bransfield strait // British Antarctic Survey. 1972. № 66. 43 p.
- Bell T.H. Jr. Topographically generated internal waves in the open ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1975. V. 80. № 3. P. 320–327. https://doi.org/10.1029/JC080i003p00320

- 5. *Boyce F.* Internal waves in the Straits of Gibraltar // Deep Sea Research. 1975. V. 22. № 9. P. 597–610. https://doi.org/10.1016/0011-7471(75)90047-9
- Egbert G., Bennett A., Foreman M. TOPEX/POSEI-DON tides estimated using a global inverse model // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. № C12. P. 24821–24852. https://doi.org/10.1029/94JC01894
- Egbert G., Erofeeva S. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- Frey D., Krechik V., Morozov E. et al. Water exchange between deep basins of the Bransfield Strait // Water. 2022. V. 14. P. 3193. https://doi.org/10.3390/w14203193
- Garcia M., Castro C.G., Rios A.F. et al. Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96 // Deep Sea Research Part II: 2002. V. 49. № 4–5. P. 585–602. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8
- 10. *Garrett C., Munk W.* Internal waves in the ocean // Annual review of fluid mechanics. 1979. V. 11. № 1. P. 339–369.
- 11. *Garrett C., Munk W.* Space-time scales of internal waves: A progress report // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1975. V. 80. № 3. P. 291–297. https://doi.org/10.1029/JC080i003p00291
- 12. *Gerkema T., Zimmerman J.* An introduction to internal waves // Lecture Notes, Royal NIOZ, Texel. 2008. 207 p.
- Gordon A., Nowlin W.D. Jr. The basin waters of the Bransfield Strait // Journal of Physical Oceanography. 1978. V. 8. № 2. P. 258–264. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0258: TBWOTB>2.0.CO;2
- Helfrich K., Melville W. Long nonlinear internal waves // Annual review of fluid mechanics. 2006. V. 38. № 1. P. 395–425. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092129
- 15. *Holm-Hansen O., Mitchell B.* Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region // Deep Sea Research Part I. 1991. V. 38. № 8–9. P. 961–980. https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90092-T
- 16. *Khimchenko E., Frey D., Morozov E.* 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
- 17. *Klinkhammer G.P., Chin C.S., Keller R.A. et al.* Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica // Earth and Planetary Science Letters. 2001. V. 193. № 3–4. P. 395–407. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00536-2
- Kozlov I., Zubkova E., Kudryavtsev V. Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. V. 14(11). P. 2047–2051. https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2749681

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

- 19. Lawver L., Keller R., Fisk M., Strelin J. Bransfield Strait, Antarctic Peninsula active extension behind a dead arc // Backarc basins. Springer. 1995. P. 315-342.
- 20. Marchenko A., Morozov E., Kozlov I., Frev D. High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // Continental Shelf Research. 2021. V. 227. P. 104523. https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523
- 21. Morozov E. Semidiurnal internal wave global field // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. V. 42(1). P. 135-148. https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)92886-c
- 22. Morozov E., Kozlov I., Shchuka S., Frev D. Internal tide in the Kara Gates Strait // Oceanology. 2017. V. 57. № 1. P. 8-18. https://doi.org/10.1134/S0001437017010106
- 23. Morozov E., Marchenko A., Filchuk K. et al. Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea // Applied Ocean Research. 2019. V. 87. P. 179-191. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.024

- 24. Morozov E., Paka V., Bakhanov V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. P. L16603
- 25. Morozov E., Parrilla-Barrera G., Velarde M., Scherbinin A. The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A comparison of internal tides // Oceanologica Acta. 2003. V. 26. № 3. P. 231–241. https://doi.org/10.1016/S0399-1784(03)00023-9

- 26. Morozov E.G., Pisarev S.V., Internal tides at the Arctic latitudes (numerical experiments) // Oceanology. 2002. V. 42. № 2. P. 153–161.
- 27. Mukhametyanov R., Frey D., Morozov E. Currents in the Bransfield Strait based on geostrophic calculations and data of instrumental measurements // Izvestiya Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58(5). P. 500-506.
- 28. Niller P., Amos A., Hu J. Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region // Deep Sea Research Part I. 1991. V. 38. № 8–9. P. 943–959. https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90091-S
- 29. Polukhin A., Morozov E., Tishchenko P. et al. 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/10.31857/S0030157421050105
- 30. Savidge D., Amft J. Circulation on the West Antarctic Peninsula derived from 6 years of shipboard ADCP transects // Deep Sea Research Part I. 2009. V. 56(10). P. 1633-1655. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.05.011
- 31. Susanto R., Mitnik L., Zheng Q. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait // Oceanography. 2005. V. 18. № 4. P. 80–87.
- 32. Wefer G., Fischer G., Füetterer D., Gersonde R. Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica // Deep Sea Research Part I. 1988. V. 35. № 6. P. 891-898. https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90066-0

Internal Waves Near Half Moon Island, South Shetland Islands

O. S. Mekhova^{a, b}, D. A. Smirnova^{a, c}, E. G. Morozov^{a, d, #}, S. A. Ostroumova^{a, e}, and D. I. Frey^{a, d, f}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bSt. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^cMoscow State University, Moscow, Russia

^dMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

^eRussian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

^fMarine Hydrophysical Institute, RAS, Sevastopol, Russia

[#]e-mail: egmorozov@mail.ru

We analyze internal waves based on measurements on cruise 87 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh in the Bransfield Strait near Half Moon Island and calculations using a numerical model. The measurements were carried out on January 25, 2022 for four hours using a line of temperature and pressure sensors, along with the measurements with a CTD probe. Temperature fluctuations according to the sensors of the thermal line and the probe showed that the amplitude of internal waves is close to 5 m, sometimes reaching 15 m. According to the results of calculations of the global tidal model TPXO9, irregular semidiurnal tides predominate in the study area. Numerical calculations of the parameters of internal waves show that the baroclinic tide generated on a steep slope breaks up into higher frequency waves.

Keywords: internal waves, Bransfield Strait, model calculation, spectra
——— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.466

СТРУКТУРА ПРИДОННЫХ ПОТОКОВ В АБИССАЛЬНЫХ КАНАЛАХ АТЛАНТИКИ: СУДОВЫЕ И АВТОНОМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В КАНАЛЕ ВИМА, РАЗЛОМЕ РОМАНШ И ПРОХОДЕ КЕЙН

© 2023 г. О. С. Мехова^{1, 2, *}, Д. А. Смирнова^{1, 3}, Д. И. Фрей^{1, 4}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ²Санкт-Петербургский государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия ³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия ⁴Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия *e-mail: osmeh@yandex.ru Поступила в редакцию 06.11.2022 г. После доработки 29.11.2022 г. Принята к публикации 16.12.2022 г.

Проведено сравнение данных измерений в глубоководных каналах Атлантики, полученных в результате двух различных методов: CTD/LADCP-зондирований с научно-исследовательских судов и данных автономных заякоренных буйковых станций. Проведенное сравнение показало, что несоответствия между данными, полученными двумя разными методами, могут существенно превышать инструментальную точность приборов. Этот результат подчеркивает важность выбора точек для заякоренных станций в условиях существенных пространственных градиентов измеряемых характеристик. Результаты анализа показали, что на протяжении всего пути распространения антарктических вод несоответствия измерений имеют одинаковые порядки величин, то есть полученные выводы могут быть справедливы для всех абиссальных каналов с интенсивным потоком Антарктической донной воды.

Ключевые слова: Антарктическая донная вода, канал Вима, разлом Романш, проход Кейн, СТD, LADCP, автономные заякоренные станции

DOI: 10.31857/S0030157423040093, EDN: YJFXJQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Антарктическая донная вода (ААДВ) формируется в основном в море Уэдделла и имеет потенциальную температуру менее 2°С [32]. Часть водной массы, которая имеет потенциальную температуру ниже 0.2°C, является глубинной водой моря Уэдделла [3, 27]. ААДВ распространяется вдоль западной части Атлантического океана. Достигая района экватора, часть этих вод попадает в восточную Атлантику через глубоководные разломы Срединно-Атлантического хребта [21, 22, 24]. Другая часть антарктических вод продолжает свое движение в западной части Атлантики на север [8, 20, 28]; в трансформированном виде ААДВ попадает в Северо-Западную Атлантику. Исследования течений ААДВ важно для понимания циркуляции придонных вод Атлантики, так как их распространение влияет на тепловой баланс в океане, что, в свою очередь, оказывает влияние на климат Земли [23].

В работе рассматриваются потоки, которые распространяются из Аргентинской котловины через канал Вима в Бразильскую котловину, продолжают движение к экватору и пересекают Срединно-Атлантический хребет через разлом Романш. Далее, попадая в котловину Сьерра-Леоне, продолжают движение через проход Кейн в котловину Зеленого Мыса [25] (рис. 1). Канал Вима, имея протяженность более 700 км, является основным глубоководным каналом, по которому происходит движение ААДВ из Аргентинской в Бразильскую котловину [7, 29]. Менее существенный перенос вод между этими котловинами обеспечивается каналом Хантер и потоками над плато Санта-Катарина (Сантос) [9, 13, 17]. Разлом Романш является самым глубоководным каналом в районе экватора, длиной около 800 км и шириной от 10 до 40 км. По разлому Романш ААДВ попадает из западной части Атлантического океана в восточную [22]. Проход Кейн, соединяя котловины Сьерра-Леоне и Зеленого мыса, является наиболее глубоководным каналом, соединяющим эти котловины [6]. В данной работе рассматривается путь распространения ААДВ в Северо-Восточную Атлантику через обозначенные каналы – канал Вима, разлом Романш и проход Кейн (рис. 1).



Рис. 1. Топография дна района исследования, схема распространения ААДВ по дну Атлантики (белыми стрелками) и ключевые пороги на пути распространения антарктических вод. Желтые ромбы — заякоренные станции, красным цветом показаны разрезы, выполненные погружными приборами. Топография дна представлена по данным GEBCO 2021 [15].

Работы по исследованию глубоководных частей океана сложны и дорогостоящи и, как правило, требуют непосредственного участия научно-исследовательских судов. Измерения со спутников затрагивают только поверхностный слой океана; численное моделирование, за редким исключением [11, 12, 31], более широко используется для исследования верхнего слоя океана; работы на основе буев Deep Argo также пока малочисленны [18] и не позволяют исследовать структуру потоков в узких абиссальных каналах. Что касается судовых наблюдений, существуют два способа измерений, позволяющие получить данные по течениям в абиссальных каналах. Первый метод заключается в профилировании с научно-исследо-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

вательских судов с одновременным использованием CTD-зондов (Conductivity, Temperature, Depth) и погружных акустических доплеровских профилографов течений (LADCP – Lowered Acoustic Doppler Current Profiler). Второй метод – это постановки заякоренных автономных буйковых станций с измерителями температуры и скоростей течений. В работах разных авторов данные, полученные CTD-зондированиями, в основном используются для определения распространения водной массы, ее потенциальной температуры, солености [23]. Данные, полученные профилографами течений, дают возможность определять скорость и направления водных потоков, оценивать перенос донных вод между отдельными котловинами. СТО- и LADCP-измерения проводились во многих абиссальных каналах. Однако, для того чтобы исследовать изменчивость придонных потоков на протяжении длительного времени, необходимо использовать заякоренные автономные буйковые станции. В работе [33] представлены результаты анализа температурного режима на основе измерений, которые проводились с 1998 по 2000 гг. в канале Вима. Особенности распределения ААДВ в канале Вима на основе CTD/LADCP-измерений рассмотрены в работах [5, 26]. Измерения, выполненные в разломе Вима, позволили подробно рассмотреть движение и выполнить оценку переноса ААДВ [1]. В работе [2] проанализировано распространение ААДВ в проходе Дискавери. Также на основе данных с заякоренных станций были рассмотрены долгопериодные температурные изменения в канале Вима в работах [10, 34]. Проводился анализ статистических характеристик временных рядов по данным с заякоренных станций с 1979 по 2007 гг. в работе [35]. В разломе Романш по данным CTD/LADCP и автономных заякоренных станций были исследованы динамические процессы в районе интенсивного затока вод в разлом [16, 30].

Несмотря на большой ряд работ как отдельно по данным профилирования, так и по данным заякоренных станций, до сих пор практически не было выполнено исследований по сравнению данных, получаемых двумя различными методами. В работе [10] приведены данные как СТД-зондирований, так и данных заякоренной станции в канале Вима. В этой работе показано, что два подхода могут давать заметно различный результат в определении долговременных трендов изменения температуры. В частности, это связано с большим горизонтальным поперечным градиентом температуры в придонном слое канала Вима. Измерения CTD-зондом на протяжении многих лет проводились около восточной стенки канала для сравнения в разные годы. Буйковая станция стояла в центре канала, где температура была немного выше за счет горизонтального градиента температуры. Известно, что оценки переноса ААДВ в абиссальных каналах, выполненные двумя разными методами, имеют достаточные существенные несоответствия [4, 23]. Точные количественные сравнения между данными CTD/LADCP и данными автономных измерений в абиссальных каналах Атлантики ранее не проводились. Поэтому в данной работе сравниваются одномоментные измерения температуры донных вод и скорости течений, полученные с помощью CTD/ LADCP-профилографов, и данные, полученные с заякоренных станций. Для работы были выбраны канал Вима, разлом Романш и проход Кейн, где работы погружным оборудованием совпадали по времени с работой заякоренных станций.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Параллельное использование СТD- и LADCPзондов для погружных станций, так же как и использование набора из датчиков температуры, давления и акустических измерителей течений в заякоренных станциях является современным способом получения информации о гидрофизических процессах в абиссальном слое океана. Ниже представлена подробная информация по используемым CTD/LADCP-зондам (раздел 2.1), оборудованию на автономных заякоренных станциях (раздел 2.2), а также использованным для сравнения данным (раздел 2.3).

2.1. CTD/LADCP-зондирования

СТD-зондирования выполнялись с помощью зонда SBE 19 plus SEACAT фирмы SeaBird, предназначенного для работы на глубинах до 6800 м. Прибор позволяет получить вертикальный профиль температуры и электропроводности. На основе этих физических величин рассчитываются глубина, потенциальная температура, соленость, потенциальная плотность и другие необходимые параметры. SBE 19 plus работал непрерывно, со скоростью четыре сканирования в секунду (4 Hz).

Параллельно с СТД-зондом для измерения вертикального профиля скоростей использовался погружной акустический доплеровский профилограф течений LADCP модели Workhorse Sentinel 300 kHz. Прибор работал в погружном режиме (lowered), в режимах "bottom track" и "water track". В режиме "water track" прибор измеряет скорость движения воды относительно прибора по сигналу, испускаемому на рабочей частоте с некоторой дискретностью по времени. В режиме "bottom track" измеритель автоматически определяет положение прибора относительно дна на расстоянии до 300 м по дополнительному импульсу, испускаемому на вдвое меньшей частоте и с большей дискретностью по времени. CTD/LADCPзонды монтировались на один комплекс SBE 32 Carousel Water Sampler (розетту). Профили температуры, солености и скорости течения получаются параллельно за одно зондирование.

2.2. Автономные буйковые заякоренные станции

Буйковые заякоренные станции были оснащены измерителями течений и серией датчиков температуры на тросе, натянутом между якорем на дне и глубоководной плавучестью. Измерения течений велись автономно с интервалом от 10 мин до 2 ч. Так как это долговременные станции, то полученные данные дают возможность анализировать изменения, происходившие в водных массах за все время работы станций.



Рис. 2. Схемы, координаты, время работы буйковых заякоренных станций в канале Вима, разломе Романш, проходе Кейн. Серыми кругами обозначены элементы плавучести. Цифрой 1 обозначена автономная станция у западного склона канала Вима, цифрой 2 – у восточного. Черными прямоугольниками показаны датчики температуры и акустические профилографы скорости течений, цифрами справа от них указаны горизонты их постановки. Внизу схемы обозначены глубины постановки автономных буйковых станций. Под схемами даны координаты постановки буйковых станций.

Оба способа измерений имеют свои преимущества и недостатки. В целом, отдельные зондирования позволяют относительно быстро получать информацию о пространственной структуре придонного потока в определенном районе. Автономные заякоренные станции позволяют исследовать временную изменчивость течений. При анализе данных, полученных этими методами, важно понимать ограничения обоих методик. В частности, заякоренные станции отражают изменчивость скорости потока только в отдельно выбранной точке, и таких точек мало. Выбор координат постановки автономных заякоренных станций становится особенно важным в относительно широких проходах, где меандрирование потока может быть трактовано как ослабление или усиление придонного потока. Самая быстрая струя может проходить мимо измерителя течений. Разрез LADCP лучше покрывает пространство, но не дает изменчивости потока во времени. В таких случаях совместное использование данных СТD/LADCP-зондирований и данных автономных станций становится особенно актуальным.

2.3. Используемые данные

В работе используются данные, полученные по пяти CTD/LADCP-зондированиям, выполненным в канале Вима в 2005 г., по пяти CTD/ LADCP-зондированиям, выполненным в 2006 г., и по двум заякоренным станциям, которые работали в этот период в районе выполнения разрезов. Разрезы имеют четкое зональное направление и располагаются перпендикулярно направлению движения потока, поэтому основное значение имеет меридиональная составляющая скорости.

В разломе Романш используются данные с одиночных погружных станций, выполненных в 2013 и в 2014 гг., и с заякоренной станции, координаты которой совпадают с координатами зондирований. Разлом Романш ориентирован с запада на восток. Однако исследуемая седловина находится в районе затока антарктических вод в разлом в его западной части. Поток ААДВ в придонном слое здесь ориентирован меридионально, с юга на север. Следовательно, в данной работе мы будем анализировать меридиональную компоненту измеренной скорости.

В проходе Кейн используются данные погружных и заякоренной станции за 2010 и 2011 гг. Канал имеет направление 330°. Разрезы выполнены перпендикулярно потоку. Для сравнительного анализа измерений были взяты данные с автономных буйковых заякоренных станций и ближайших CTD/LADCP-зондирований.

Для определения потенциальной температуры на буйковых станциях были взяты значения солености, полученные с помощью интерполяции данных CTD-зондирований в точки, соответствующие местоположению датчиков заякоренных станций. Координаты и время проведения измерений представлены в табл. 1, расположения станций показаны на рис. 1. Измерения с судов проводились от поверхности до дна. Схемы буйковых станций показаны на рис. 2.

Канал Вима								
дата	станция	координаты	нижний горизонт, м					
25.10.2005	1703	31°12.0' ю.ш., 39°18.3' з.д.	4360					
26.10.2005	1704	31°12.0' ю.ш., 39°19.7' з.д.	4460					
26.10.2005	1705	31°12.0' ю.ш., 39°21.9' з.д.	4520					
26.10.2005	1706	31°12.0' ю.ш., 39°23.8' з.д.	4560					
26.10.2005	1707	31°12.0' ю.ш., 39°26.3' з.д.	4540					
11.11.2006	1860	31°12.0' ю.ш., 39°18.4' з.д.	4400					
12.11.2006	1861	31°12.0' ю.ш., 39°20.1' з.д.	4500					
12.11.2006	1862	31°11.9' ю.ш., 39°23.4' з.д.	4580					
12.11.2006	1863	31°12.0' ю.ш., 39°26.3' з.д.	4560					
12.11.2006	1864	31°12.0' ю.ш., 39°28.0' з.д.	4120					
30.05.2005-18.05.2007	Заякоренная станция	31°15.6' ю.ш., 39°27.0' з.д.	3255, 4033, 4367					
31.05.2005-18.05.2007	Заякоренная станция	31°15.0' ю.ш., 39°19.2' з.д.	3077, 3679, 3922, 4255, 4479, 4513					
	Р	азлом Романш						
8.10.2013	2513	1°5.2' ю.ш., 22°27.8' з.д.	4688					
16.04.2014	2537	1°5.0′ ю.ш., 22°27.7′ з.д.	4688					
8.10.2013-16.04.2014	Заякоренная станция	1°5.0′ ю.ш., 22°27.7′ з.д.	4422, 4611					
		Проход Кейн	·					
20.10.2010	2423	9°20.5' с.ш., 19°54.2' з.д.	4504					
20.10.2010	2424	9°21.1' с.ш., 19°52.8' з.д.	4464					
20.10.2010	2425	9°22.2' с.ш., 19°50.9' з.д.	4568					
21.10.2010	2426	9°23.3' с.ш., 19°48.6' з.д.	4560					
18.10.2011	2461	9°25.0' с.ш., 19°46.0' з.д.	4384					
18.10.2011	2462	9°23.5' с.ш., 19°48.0' з.д.	4544					
19.10.2011	2463	9°22.4′ с.ш., 19°50.1′ з.д.	4560					
19.10.2011	2464	9°21.5' с.ш., 19°52.0' з.д.	4536					
19.10.2011	2465	9°20.5' с.ш., 19°54.5' з.д.	4488					
21.10.2010-18.10.2011	Заякоренная станция	9°20.1' с.ш., 19°52.5' з.д.	4352, 4477, 4561					

Таблица 1. Координаты, глубины и время CTD/LADCP-зондирований и автономных станций в канале Вима, разломе Романш и проходе Кейн

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Термохалинная структура Антарктической донной воды изменяется по мере продвижения из Южного полушария в Северное за счет перемешивания с вышележащей Северо-Атлантической глубинной водой. На построенных разрезах для описания структуры водных масс были определены границы Антарктической донной воды и границы глубинных вод моря Уэдделла; границы водных масс определялись по изотермам потенциальной температуры 2 и 0.2°С соответственно. Несоответствия температуры и компонент скорости течений, измеренных разными методами, анализируются в трех различных диапазонах глубин: внутри канала, над каналом в слое ААДВ и выше изотермы 2°С. Для сравнения измерений, полученных CTD/LADCP-зондированиями, с измерениями заякоренных станций в табл. 2, 3, 4, 5 собраны данные по температуре T, потенциальной температуре θ , U- и V-компонентам скорости течений автономных станций, данные по температуре и потенциальной температуре с CTD-зондов, зональной (U) и меридиональной (V) составляющих скорости с погружных акустических доплеровских профилографов течений (LADCP). Также в таблицах есть значения разницы между измерениями зондов и датчиков автономных станций.

3.1. Канал Вима

В канале Вима в 2005 и 2006 гг. были выполнены зональные разрезы по 31°12' ю.ш. поперек абиссального потока. Распределения потенциаль-



Рис. 3. Зональные разрезы в канале Вима, выполненные в 2005 (а, в) и 2006 (б, г) гг. На рисунках (а) и (б) показаны распределения потенциальной температуры в °C, на рисунках (в) и (г) – меридиональная составляющая скорости в см/с для 2005 и 2006 гг. соответственно. Жирными горизонтальными черными линиями показаны изотермы 2 и 0.2°C, определяющие слои ААДВ и глубинных вод моря Уэдделла соответственно. Зеленые кружки показывают горизонты, на которых были установлены датчики температуры и измерители скорости течений на заякоренных буйковых станциях (жирные вертикальные линии). Положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север.

ной температуры и меридиональной составляющей скорости течения представлены на рис. 3.

На рис. За и 36 можно отметить, что наиболее холодные воды, имеющие потенциальную температуру ниже -0.1°C, проходят по дну канала и смещаются к восточному склону канала. Это явление хорошо известно и объясняется влиянием экмановского трения, которое в Южном полушарии смещает воду в придонном слое вправо от основного потока [14, 19]. У восточной стенки канала поток холодной воды поднимается до 4250-4300 м в оба года. Однако есть разница в ее распределении в западной части канала. В 2005 г. изотерма — 0.1°С доходит до подножия западного склона на глубине 4550 м. В 2006 г. она поднимается выше, примерно до середины западной стенки канала на глубину 4350 м. При этом и в 2005. и в 2006 гг. изотерма, характеризующая границу глубинных вод моря Уэдделла ($\theta = 0.2^{\circ}$ C), располагается у восточной стенки канала Вима на глубине 4200-4250 м и свободно проходит над его западным склоном на глубине 4000 м. Следовательно, объемный перенос этих вод в оба года практически одинаковый, но в 2006 г. средняя потенциальная температура придонного слоя ниже. Изотерма 2°С, которая принята для определения границы ААДВ, проходит, в среднем, на глубине 3500 м. При рассмотрении меридиональной составляющей скорости потока (рис. Зв и Зг) видно, что внутри стенок канала поток движется на север. В 2005 г. есть два ядра скорости: одно находится у западного склона в 50-350 м от дна и распространяется до середины канала, второе ядро, меньших размеров, мощностью 150 м - у восточного склона. Максимальные скорости в этих потоках – 26–27 см/с. В 2006 г. наблюдается только одно ядро скорости, оно начинается у западного склона и охватывает больше половины ширины канала. Ядро приподнято на 100 м от дна, охватывает слой толщиной до 400 м и имеет максимальное значение скорости 34 см/с. На глубинах более 3000 м также видны противотечения, которые частично захватывают ААДВ. В 2005 г. изменение направления движения потока происходит на глубине 3900 м. В 2006 г. изменение направления потока располагается на глубине 3700 м над центральной и восточной частями канала. Максимальные значения скорости в этих потоках располагаются выше



Рис. 4. Временная изменчивость температуры (а) и меридиональной компоненты скорости (б). Данные взяты с датчиков автономной заякоренной станции, находящейся у восточного склона канала Вима. Рассматривается период с 01:00 25 октября 2005 г. по 23:00 26 октября 2005 г.; в этот же период проходили измерения на поперечном CTD/LADCPразрезе. Положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север.

изотермы 2°С. В 2005 г. 10–11 см/с – на глубине 3200 м, а в 2006 г. 25 см/с на – глубине 3000 м.

Для определения изменчивости температуры и меридиональной компоненты скорости были построены временные ряды измерений на автономных станциях (рис. 4).

На заякоренной станции измерения выполнялись каждые два часа. Датчики на горизонтах 3077, 3679, 3922 (датчики 6, 5, 4) находятся выше стенок канала. На самом глубоком горизонте (4513 м) за весь рассматриваемый период не было зафиксировано изменений температуры. Возможно, это произошло из-за технического сбоя прибора, или изменения температуры были меньше погрешности прибора. На глубине 4479 м амплитуда колебаний температуры составляла 0.004°С. Самые большие колебания температуры наблюдались на третьем от дна датчике, на глубине 4255 м (верхняя граница канала), и на пятом датчике на глубине 3679 м, в диапазонах 0.135 и 0.137°С соответственно. На горизонте 3922 м (четвертый датчик) амплитуда колебаний достигала 0.072°С, в то время как на самом верхнем горизонте (3077 м) – 0.056°С.

На рис. 4б положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север. Верхние датчики, находящиеся над каналом, показывают направление потока на юг, внутри канала — на север. На горизонтах 4513 и 4479 (самые глубокие датчики) зафиксирована максимальная амплитуда значений *V*-компоненты в 4 см/с. Третий и пятый датчик показали самые большие амплитуды, 8 и 7 см/с соответственно. На горизонте 3922 — 3 см/с, а на самом верхнем горизонте — 6 см/с.

Можно сделать вывод, что в придонном слое наблюдаются наименьшие колебания как по температуре, так и по скорости. Большие колебания этих значений наблюдаются в зоне высоких градиентов на верхней границе канала и над каналом. По всей видимости, низкие вариации исследуемых характеристик в канале объясняются слабой вертикальной стратификацией вод, а также относительной стабильностью потока ААДВ по сравнению с потоками над каналом.

Сравнение измерений, полученных в ходе CTD/ LADCP-зондирований, с измерениями на заякоренных станциях в 2005 г. в канале Вима показало, что измерения температуры с CTD-зонда практически на всех рассматриваемых горизонтах дают завышение значений (табл. 2).

Наилучшая сходимость значений зафиксирована для придонных измерений у восточного склона на горизонте 4479 м ($\Delta T = 0.000^{\circ}$ C). С уменьшением глубины расхождения в измерениях увеличиваются. На глубине 4255 м расхождения составляют тысячные доли градуса ($\Delta T = 0.006^{\circ}$ C), выше глубины 3900 м и до верхней границы ААДВ они становятся близки к 0.1°С. В точке, находящейся выше изотермы 2°С, над восточным склоном на горизонте 3077 м, разница между данными CTDзонда и датчика с заякоренной станции уменьшается до 0.06°С. Измерения, проведенные у западного склона, показывают, что в слое ААДВ лучшее схождение данных – у придонных измерений на горизонте 4367 м, но даже тут разница составляет -0.021°С. Это единственное измерение, в котором значения с СТД-зонда меньше по сравнению с датчиком заякоренной станции. Различие на горизонте 4033 м, который также находится в слое Антарктической донной воды, уже равно 0.144°С. На глубине 3255 м (выше изотермы 2°С) расхождения в значениях ΔT становятся меньше и составляют 0.014°С.

Канал Вима имеет меридиональное направление, поэтому *V*-компонента скорости является основной и должна быть значительно больше *U*-компоненты. Измерения показали, что это

Таблица 2. Данные по температуре, потенциальной температуре, *U*- и *V*-компонентам скорости в канале Вима по результатам CTD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 — у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями CTD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2005 г. Прочерком показано отсутствие данных

	Канал Вима, 2005 г.							
№ станций			1704				1707	
Горизонты, м	3077	3679	3922	4255	4479	3255	4033	4367
<i>Т</i> (буй), °С	2.733	1.850	1.224	0.307	0.223	2.710	0.414	0.261
T(CTD), °C	2.793	1.956	1.319	0.313	0.223	2.724	0.558	0.240
θ (буй), °С	2.476	1.550	0.913	-0.014	-0.120	2.435	0.115	-0.071
θ(CTD), °C	2.534	1.652	1.006	-0.006	-0.119	2.448	0.255	-0.089
ΔT , °C	0.060	0.106	0.095	0.006	0.000	0.014	0.144	-0.021
Δθ, °C	0.058	0.102	0.093	0.008	0.001	0.013	0.140	-0.018
U(буй), см/с	2.2	3.9	3	-2	_	0.2	-2.6	2.3
U(LADCP), см/с	-2	10.6	7.2	-6	_	-2.7	2.9	-2.4
V (буй), см/с	-6.4	-7.2	-1.9	30.1	_	0.3	15.9	20.8
V(LADCP), см/с	-2	-1.2	3.6	25.2	_	-2.6	6.4	28.5
ΔU , см/с	-4.2	6.7	4.2	-4	_	-2.9	5.5	-4.7
ΔV , см/с	4.4	6	5.5	-4.9	_	-2.9	-9.5	7.7

условие практически всегда выполняется, кроме горизонтов 3679 и 3922 м у восточного склона. гле U-компонента в 2 раза и более превышает V-компоненту. Это может быть связано с тем, что измерения попали в слой перемешивания двух противоположно направленных потоков. Наибольшие значения меридиональной компоненты скорости зафиксированы на самых близких ко дну горизонтах; это показывают и LADCP, и измерители скорости на заякоренных станциях. Разница между данными скоростей, полученных разными методами, в слое ААДВ увеличивается с уменьшением глубины: от -4 до 6.7 см/с для U-компоненты и от -4.9 до 6 см/с для *V*-компоненты скорости v восточного склона: от −4.7 до 5.5 см/с и 7.7 до -9.5 см/с для U- и V-компонент, соответственно, у западного склона. В точках, находящихся выше 3500 м, т.е. выше слоя ААДВ, разница между значениями компонент скорости уменьшается. Над восточной стенкой канала она принимает значения -4.2 и 4.4 см/с для U- и V-компонент соответственно, над западной стенкой становится равной -2.9 см/с для обеих компонент.

Сравнение данных по температуре, полученных в 2006 г., так же, как и в 2005 г., показывают частое завышение значений с СТД-зондов (табл. 3).

Измерения температуры в восточной и западной частях канала Вима имеют наименьшую разность измеряемых параметров на горизонтах, которые находятся ближе всего ко дну. У восточного склона на горизонте 4255 м разница температур составляет $\Delta T = -0.029^{\circ}$ С. У западного склона на горизонте 4367 м эта разность меньше и составляет $\Delta T = -0.010^{\circ}$ С. В слое ААДВ с уменьшением глубины разница в показаниях приборов увеличивается. У восточного склона, на горизонте 3922 м, она составляет $\Delta T = 0.044^{\circ}$ С, на горизонте 3679 м уже $\Delta T = 0.142^{\circ}$ С. У западного склона на горизонте 4033 м $\Delta T = 0.132^{\circ}$ С. На горизонтах выше изотермы 2°С расхождения в измерениях уменьшаются и принимают значения $\Delta T = 0.052^{\circ}$ С над восточным склоном (глубина 3077 м) и $\Delta T =$ = 0.005°С над западным (глубина 3255 м).

При сравнении компонент скорости видно, что в самых глубоких точках наибольшие расхождения наблюдаются у меридиональной компоненты скорости. В восточной части канала на горизонте 4255 м расхождение составляет -12.1 см/с, в западной части – -7 см/с. С уменьшением глубины эта разница становится меньше. Над восточным склоном на горизонтах 3922 и 3679 м различия составляют -2.3 и 2.3 см/с соответственно. Над западным склоном на глубине 4033 м разница также невелика, $\Delta V = -2.5$ см/с. Зональные компоненты, в отличие от меридиональных, в самых глубоких точках имеют меньшие расхождения в 3.4 см/с у восточной стенки канала и -5 см/с у западной. С уменьшением глубины разница в измерениях LADCP и буйковых станций становится в несколько раз больше. В восточной части канала на горизонтах 3922 м $\Delta U = 19.5$ см/с, на 3679 м $\Delta U = 17.7$ см/с. Именно в этих точках по измерениям LADCP и профилографов автономных станций зафиксировано превышение в несколько раз величины меридиональной компо-

Таблица 3. Данные по температуре, потенциальной температуре, *U*- и *V*-компонентам скорости в канале Вима по результатам CTD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 — у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями CTD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2006 г.

	Канал Вима, 2006 г.							
№ станций		18	60			1863		
Горизонты, м	3077	3679	3922	4255	3255	4033	4367	
<i>Т</i> (буй), °С	2.694	1.965	1.426	0.225	2.641	0.330	0.230	
T(CTD), °C	2.746	2.107	1.470	0.196	2.646	0.462	0.220	
θ (буй), °С	2.438	1.661	1.110	-0.093	2.367	0.033	-0.101	
θ(CTD), °C	2.488	1.799	1.153	-0.120	2.371	0.162	-0.109	
ΔT , °C	0.052	0.142	0.044	-0.029	0.005	0.132	-0.010	
Δθ, °C	0.050	0.138	0.043	-0.027	0.004	0.129	-0.008	
U(буй), см/с	3	-1.9	-4.2	-1.4	-1.7	-6	-4.7	
U(LADCP), см/с	2.3	15.8	15.3	2	-2.9	-16.1	-9.7	
V(буй), см/с	-8.7	0	5.5	28.8	-13.7	22	31.5	
V(LADCP), см/с	-18.9	2.2	3.2	16.7	0.8	19.5	24.5	
ΔU , см/с	-0.7	17.7	19.5	3.4	-1.2	-10.1	-5	
ΔV , см/с	-10.2	2.2	-2.3	-12.1	14.5	-2.5	—7	

ненты скорости над зональной. В западной части на горизонте 4033 м $\Delta U = -10.1$ см/с. Сравнение данных в точках с глубинами меньше 3500 м (выше потока ААДВ) показывает минимальное расхождение примерно в 1 см/с.

В канале Вима в 2005 г. наименьшие абсолютные ошибки температуры и *U*, *V*-компонент скорости наблюдаются внутри канала и выше слоя ААДВ. В 2006 г. различия температуры и зональной компоненты скорости распределяются так же, как в 2005 г. Расхождение у меридиональной компоненты скорости минимально над каналом внутри слоя ААДВ.

3.2. Разлом Романш

В разломе Романш в 2013 и 2014 гг. были сделаны серии измерений. В этой работе анализируются данные, полученные с CTD/LADCP на станциях 2513 (2013 г.) и 2537 (2014 г.), выполненных на седловине в западной части разлома. Измерения на этих станциях выполнялись при постановке и поднятии заякоренной буйковой станции. Профили потенциальной температуры, *U*-и *V*-составляющих скорости показаны на рис. 5.

По профилям потенциальной температуры видно, что ААДВ ($\theta < 2^{\circ}$ C) распространяется в слое от дна до глубины 3750 м, минимальные значения потенциальной температуры у дна составляют 0.52°C. Глубинные воды моря Уэдделла ($\theta < 0.2^{\circ}$ C) в разлом не доходят (рис. 5а). Этот процесс объясняется перемешиванием донных вод

по ходу их распространения на север и наличием орографических барьеров на этом пути.

В верхних слоях разлома Романш антарктические воды движутся медленнее и могут менять направление. Максимальные скорости потока ААЛВ наблюдаются в придонном слое, не превышающем 200 м. Происходит резкое увеличение скорости с глубины 4400 до 4600 м. Ниже 4600 м скорости быстро уменьшаются при приближении ко дну (рис. 56, 5в). Данные, полученные в 2013 г., показали изменения направления меридиональной составляющей скорости на глубине 4350 м с южного на северное. Максимальное значение V-компоненты скорости составляет 39 см/с. В 2014 г. меридиональная составляющая скорости в потоке ААДВ направлена на север и имеет максимальное значение 48 см/с. Зональные составляющие скорости имеют малые значения не только в верхних слоях ААДВ, но и в придонном слое (рис. 56, 5в).

Для сравнения измерений, полученных в процессе CTD/LADCP-зондирований, и измерений на заякоренных станциях в разломе Романш рассматриваются два горизонта внутри канала (4422 и 4611 м). Оба горизонта находятся в слое ААДВ. Выполнение CTD/LADCP-зондирований совпадало по времени с моментами постановки и поднятия автономной заякоренной станции. На придонном горизонте 4611 м $\Delta T = 0.03^{\circ}$ С, на горизонте 4422 м $\Delta T = -0.037^{\circ}$ С (табл. 4). В 2014 г. на придонном горизонте (4611 м) разница в измерениях составляет 0.015°С, но на горизонте 4422 м она резко увеличивается до 0.183°С.



Рис. 5. Профили потенциальной температуры, полученные с СТD-зондирований на станциях 2513 (красная линия) и 2537 (синяя линия) (а). Сплошными черными линиями отмечены горизонты, на которых были поставлены датчики на заякоренной станции, подписаны их глубины; пунктирной линией — изотерма потенциальной температуры 2°С. Графики зональной (зеленые линии) и меридиональной (розовые линии) компонент скорости потока и оценки ошибок, выполненные алгоритмом обработки LADCP-данных LDEO (области, выделенные светло-зеленым и светло-розовым цветом), показаны по данным погружного LADCP на станциях 2513 (б) и 2537 (в), выполненных в разломе Романш в 2013 и 2014 гг. соответственно. Положительные значения зональной компоненты соответствуют направлению на восток, положительные значения меридиональной компоненты — направлению на север.

Самые большие значения компонент скорости и в 2013 и в 2014 гг. зафиксированы на наиболее глубоком горизонте (4611 м). В 2013 г. несоответствия между двумя методами измерения скорости увеличиваются с уменьшением глубины. На горизонте 4611 м $\Delta U = 3.3$ см/с и $\Delta V = -9.8$ см/с, к глубине 4422 м эти значения увеличиваются до $\Delta U = 17.7$ см/с и $\Delta V = -10.2$ см/с. В 2014 г. эти несоответствия становятся существенно меньшими. На придонном горизонте $\Delta V = 0.9$ см/с, а на

Таблица 4. Данные по температуре, потенциальной температуре, *U*- и *V*-компонентам скорости в канале Вима по результатам CTD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 — у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями CTD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2013 и 2014 гг.

	Разлом Романш 2013 г.		Разлом Романш 2014 г.		
№ станций	2513		2537		
Горизонты, м	4422	4611	4422	4611	
<i>Т</i> (буй), °С	1.290	0.890	1.280	0.890	
T(CTD), °C	1.253	0.921	1.463	0.905	
θ (буй), °С	0.920	0.511	0.911	0.511	
θ(CTD), °C	0.886	0.543	1.090	0.527	
ΔT , °C	-0.037	0.031	0.183	0.015	
Δθ, °C	-0.034	0.032	0.179	0.016	
U(буй), см/с	-9.6	12.5	-2.4	9.7	
U(LADCP), см/с	8.1	15.8	-5.5	2.8	
<i>V</i> (буй), см/с	20.1	47.8	19.7	45.2	
V(LADCP), см/с	9.9	38	16.9	46.1	
ΔU , см/с	17.7	3.3	-3.1	-6.9	
ΔV , см/с	-10.2	-9.8	-2.8	0.9	

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 6. Разрезы в проходе Кейн, выполненные в 2010 (а, в) и 2011 (б, г) гг. На рисунках (а) и (б) показано распределение потенциальной температуры в °C, на рисунках (в) и (г) – скорости потока в см/с для 2010 и 2011 гг. соответственно. Положительные скорости имеют направления вдоль прохода (330°). Обозначения на рисунке аналогичны рис. 3.

горизонте 4422 м $\Delta V = -2.8$ см/с. Расхождения в измерениях зональной компоненты становятся меньше с увеличением расстояния от дна (от -6.9 до -3.1 см/с).

3.3. Проход Кейн

В проходе Кейн в 2010 и 2011 гг. были проведены прямые измерения термохалинной структуры вод и скоростей течений (рис. 6).

Распределение потенциальной температуры в проходе Кейн говорит о том, что слой ААДВ в этом районе имеет толщину более 500 м, изотерма 2°С находится на глубине 4000 м в 2010 г. и на глубине 3800—3900 м в 2011 г. При анализе скорости движения потока водной массы в проходе Кейн видно, что в разные годы она имеет противоположные направления. В 2010 г. наблюдались два ядра скорости, направленные в сторону котловины Зеленого мыса. У западного склона ядро имеет максимальную скорость 12 см/с, у восточного склона – 10 см/с. Максимальные значения скоростей наблюдаются в придонном слое. Между этими потоками находится струя, которая имеет противоположное направление. Изменение на-

правления потока происходит на глубине 4300 м, а максимальные скорости зафиксированы на глубине 4000 м, что соответствует верхней границе ААДВ. В 2011 г. наблюдается совсем небольшая струя, направленная в сторону котловины Зеленого мыса у восточного склона; ее вертикальный размер составляет около 100 м, максимальные скорости – 5 см/с. Основная водная масса имеет противоположное направление. Этот поток неоднороден по скорости, значения в нем меняются от 0 до 10 см/с.

В проходе Кейн заякоренная станция стояла в 2010–2011 гг. При ее постановке и снятии выполнялись CTD/LADCP-зондирования (табл. 1). Несоответствия в измерениях датчиков температуры на горизонте 4352 м в оба года составляли около 0.01°С. На более глубоком горизонте (4477 м) в 2011 г. расхождение в показаниях датчиков увеличилось до $\Delta T = -0.023$ °C (табл. 5).

В 2010 г. на горизонте 4352 м разница в измерениях меридиональной компоненты скорости составляла 8.1 см/с, а зональной — -7.6 см/с. По данным 2011 г. можно сказать, что с уменьшением глубины ΔU и ΔV увеличиваются. ΔU изменяется с -0.7 до 8.9 см/с, ΔV – с 7 до 9.3 см/с.

	Проход Кейн, 2010 г.	Проход Ке	ейн, 2011 г.
№ станций	2424	24	64
Горизонты, м	4352	4352	4477
<i>Т</i> (буй), °С	2.270	2.260	2.290
T(CTD), °C	2.261	2.273	2.267
θ (буй), °С	1.880	1.870	1.883
θ(CTD), °C	1.870	1.882	1.861
ΔT , °C	-0.009	0.013	-0.023
Δθ, °C	-0.010	0.012	-0.022
U(буй), см/с	4.3	-8.4	-0.3
U(LADCP), см/с	-3.3	0.5	-1
<i>V</i> (буй), см/с	2.6	-8.5	-6.9
V(LADCP), см/с	10.7	0.8	0.1
ΔU , см/с	-7.6	8.9	-0.7
ΔV , см/с	8.1	9.3	7

Таблица 5. Данные по температуре, потенциальной температуре, *U*- и *V*-компонентам скорости в канале Вима по результатам CTD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 — у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями CTD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2010 и 2011 гг.

4. ВЫВОДЫ

По данным CTD/LADCР-зондирований верхняя граница ААДВ ($\theta = 2^{\circ}$ С) в потоке через канал Вима, разлом Романш, проход Кейн постепенно опускается с 3500 м в первом глубоководном канале до 3750 м во втором и до 4000 м в третьем. Придонная температура при этом увеличивается по пути следования антарктических вод. Глубоководные воды моря Уэдделла с потенциальной температурой ниже 0.2°С не проходят дальше Бразильской котловины. Максимальные скорости потоков зафиксированы внутри каналов, в среднем в 100-300 м от дна. Измерения, сделанные автономной станцией в канале Вима, показали, что наименьшие колебания температуры и скорости потока наблюдаются внутри канала. На верхней границе канала и над ним эти колебания резко увеличиваются.

Сравнение данных по температуре и скорости, полученных с заякоренных буйковых станций и данных CTD/LADCP-зондирований, показало несоответствия в измеренных значениях, достигающих 0.183°C и 17.7 см/с в придонном слое внутри каналов, 0.144°С и 19.5 см/с в слое ААДВ над каналами и 0.14°С и 14.5 см/с в более верхних слоях Северо-Атлантической глубинной воды. Это может быть связано как с инструментальными ошибками приборов, так и с пространственной и временной изменчивостью; при этом проведенный анализ показывает, что в отдельных точках пространственная изменчивость вносит существенно больший вклад, чем ошибки приборов. Только в разломе Романш измерения проводились в одной точке с заякоренной станцией.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

В канале Вима и в проходе Кейн были взяты ближайшие по дистанции к заякоренным станциям точки, в которых проводились CTD/LADCPзондирования. Несоответствия, наблюдаемые в канале Вима, разломе Романш и проходе Кейн, имеют один порядок величины. Это говорит о том, что полученные качественные результаты, вероятно, применимы для любых абиссальных каналов с интенсивными придонными потоками ААДВ. Проведенное сравнение также показывает, что временная изменчивость температуры и скорости внутри каналов на масштабе от нескольких часов до суток в большинстве случаев вносит меньший вклад, чем пространственная изменчивость. Этот факт объясняется в первую очередь большими градиентами температуры и скоростей в поперечном придонному потоку направлении. При этом на больших временны́х масштабах изменчивость по времени становится существенной и должна приниматься во внимание при анализе CTD/LADCP-зондирований, проводимых в отдельно взятые моменты времени. Большие горизонтальные градиенты характеристик придонных потоков обуславливают критичность корректного выбора мест установки заякоренных станций; малое смещение этих станций в пространстве может сильно влиять на получаемые результаты и должно приниматься во внимание при анализе данных.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках госзадания № FMWE-2021-0002 (судовые измерения) и при поддержке гранта РНФ № 21-77-20004 (анализ натурных данных и интерпретация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Демидов А.Н., Добролюбов С.А., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю. Перенос придонных вод через разлом Вима Срединно-Атлантического хребта // Доклады РАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 395–399.
- 2. Капустина М.В., Кречик В.А. Распространение Антарктической донной воды в глубоководном проходе Дискавери (Северо-Восточная Атлантика) по данным натурных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 690–701. https://doi.org/10.31857/S0030157421050051
- 3. Морозов Е.Г., Демидова Т.А., Лаппо С.С. и др. Распространение Антарктической донной воды через проход Вима // ДАН. 2003. Т. 390. № 3. С. 402–405.
- 4. *Морозов Е.Г., Демидов А.Н., Тараканов Р.Ю.* Перенос Антарктических вод в глубоководных каналах Атлантики // Доклады РАН. 2008. Т. 422. № 6. С. 815–818.
- 5. *Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю.* Вытекание Антарктической донной воды из канала Вима в Бразильскую котловину // Доклады РАН. 2014. Т. 456. № 2. С. 227–230.

https://doi.org/10.7868/S0869565214140217

- 6. *Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю., Демидов А.Н.* Перенос придонных вод в проходе Кейн // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 4. С. 544–548.
- 7. Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Нейман В.Г. и др. Экстремальные скорости переноса Антарктической донной воды в глубоководном канале Вима // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 4. С. 485–488. https://doi.org/10.31857/S0869-56524864485-488
- Тараканов Р.Ю., Морозов Е.Г. Поток Антарктической донной воды на выходе из канала Вима // Океанология. 2015. Т. 55. №. 2. С. 173–181. https://doi.org/10.7868/S0030157415010165
- Borisov D., Frey D., Levchenko O. Sediment waves on the Santa Catarina plateau (western South Atlantic) // J. S. Am. Earth Sci. 2020. V. 102, 102698. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102698
- 10. Campos E.J.D., van Caspel M.C., Zenk W. et al. Warming trend in Antarctic Bottom Water in the Vema Channel in the South Atlantic // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. № 19, e2021GL094709. https://doi.org/10.1029/2021GL094709
- Frey D., Borisov D., Fomin V. et al. Modeling of bottom currents for estimating their erosional-depositional potential in the Southwest Atlantic // Journal of Marine Systems. 2022. 230(1), 103736. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103736
- Frey D.I., Fomin V.V., Diansky N.A. et al. New model and field data on estimates of Antarctic Bottom Water flow through the deep Vema Channel // Doklady Earth Sciences. 2017. 474(1). P. 561–564. https://doi.org/10.1134/S1028334X17050026
- Frey D.I., Fomin V.V., Tarakanov R.Y. et al. Bottom water flows in the Vema channel and over the Santos plateau based on the field and numerical experiments // In: Velarde M.G., Tarakanov R.Y., Marchenko A.V. (Eds.). The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography. Springer International Publishing, Cham, 2018. P. 475–485. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_29

- Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V. et al. Regional modeling of Antarctic Bottom Water flows in the key passages of the Atlantic // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. https://doi.org/10.1029/2019JC015315
- GEBCO Compilation Group. 2021. GEBCO 2021 Grid. https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f
- 16. van Haren H., Goustiaux L., Morozov E., Tarakanov R. Extremely long Kelvin Helmholtz billow trains in the Romanche fracture zone // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. № 23. P. 8445–8451. https://doi.org/10.1002/2014GL062421
- 17. *Hogg N., Siedler G., Zenk W.* Circulation and variability at the southern boundary of the Brazil Basin // Journal of Physical Oceanography. 1999. V. 29. P. 145–157. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0145: CAVATS>2.0.CO;2
- Johnson G.C., Cadot C., Lyman J.M. et al. Antarctic Bottom Water warming in the Brazil Basin: 1990s through 2020, from WOCE to Deep Argo // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47, e2020GL089191. https://doi.org/10.1029/2020GL089191
- Jungclaus J., Vanicek M. Frictionally modified flow in a deep ocean channel: Application to the Vema Channel // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104(C9). P. 21,123–21,136. https://doi.org/10.1029/1998jc900055
- Klein B., Molinari R.L., Muller T.J., Seidler G. A transatlantic section at 14.5° N: Meridional volume and heat fluxes // Journal of Marine Research. 1995. V. 53. P. 929–957. https://doi.org/10.1357/0022240953212963
- Mantyla A.W., Reid J.L. Abyssal characteristics of the World Ocean waters // Deep-Sea Research. 1983. V. 30(8). P. 805–833. https://doi.org/10.1016/0198-0149(83)90002-X
- Mercier H., Speer K.G. Transport of bottom water in the Romanche Fracture Zone and the Chain Fracture Zone // Journal of Physical Oceanography. 1998. V. 28(5). P. 779–790. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028%3c0779: TOBWIT%3e2.0.CO;2
- 23. *Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I.* Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic. Observations, Analysis, and Modeling. Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. 483 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83074-8
- Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I. et al. Bottom water flows in the tropical fractures of the northern Mid-Atlantic Ridge // Journal of Oceanography. 2018. V. 74(2). P. 147–167. https://doi.org/10.1007/s10872-017-0445-x
- 25. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., van Haren H. Transport of Antarctic Bottom Water through the Kane Gap, tropical NE Atlantic Ocean // Ocean Sci. 2013. V. 9. P. 825–835. https://doi.org/10.5194/os-9-825-2013
- Morozov E.G., Zuev O.A., Frey D.I., Krechik V.A. Antarctic Bottom Water jets flowing from the Vema Channel // Water (MDPI). 2022. V. 14(21), 3438. https://doi.org/10.3390/w14213438

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

- Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of antarctic bottom water // Prog. Oceanogr. 1999. V. 43. V. 55–109. https://doi.org/10.1016/ S0079-6611(99)00004-X
- Rhein M., Stramma L., Krahmann G. The spreading of Antarctic Bottom Water in the tropical Atlantic // Deep Sea Research Part I. 1998. V. 45. P. 507–527. https://doi.org/10.1016/s0967-0637(97)00030-7
- 29. Speer K.G., Zenk W. The flow of Antarctic Bottom Water into the Brazil Basin // Journal of Physical Oceanography. 1993. V. 23. P. 2667–2682. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<2667: TFOABW>2.0.CO:2
- 30. *Tarakanov R.Y., Morozov E.G, van Haren H. et al.* Structure of the deep spillway in the western part of the Romanche Fracture Zone // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. № 11. P. 8508–8531. https://doi.org/10.1029/2018JC013961
- Wadley M., Bigg G. Abyssal channel flow in ocean circulation models with application to the Vema Channel // Journal of Physical Oceanography. 1995. V. 26. P. 38–48.

https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0038: acfiog>2.0.co;2

589

- 32. Wüst G. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans (ed. Defant A.) Wissenschaftliche Ergebnisse, Deutsche Atlantische Expedition auf dem Forschungs – und Vermessungsschiff "Meteor" 1925–1927 // Berlin. 1936. Walter de Gruyter & Co. 6(1).
- 33. Zenk W. Temperature fluctuations and current shear in Antarctic Bottom Water at the Vema Sill // Progress in Oceanography. 2008. V. 77. № 4. P. 276–284. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.05.006
- 34. Zenk W., Morozov E.G. Decadal warming of the coldest Antarctic Bottom Water flow through the Vema Channel // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L14607. https://doi.org/10.1029/2007GL030340
- 35. Zenk W., Visbeck M. Structure and evolution of the abyssal jet in the Vema Channel of the South Atlantic // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. V. 85. P. 244–260. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.033

Structure of Bottom Flows in Abyssal Channels of the Atlantic: Comparison of Autonomous and Vessel Observations in the Vema Channel, Romanche Fracture Zone, and Kane Gap

O. S. Mekhova^{a, b, #}, D. A. Smirnova^{a, c}, D. I. Frey^{a, d}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
^bSt. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
^cMoscow State University, Moscow, Russia
^dMarine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
[#]e-mail: osmeh@yandex.ru

Oceanographic data from measurements in deep-water channels of the Atlantic Ocean were analyzed. Data from two different methods were compared: CTD/LADCP measurements from research vessels and data from autonomous mooring stations. The comparison showed that discrepancies between the data obtained by two different methods can significantly exceed the instrumental accuracy of the instruments. This result highlights the importance of correct selection of mooring station locations in conditions of significant spatial gradients in measured characteristics. The results of the analysis showed that throughout the Antarctic waters pathway, the measurement differences are of the same orders of magnitude. Therefore, the conclusions can be valid for all abyssal channels with intense AABW flows.

Keywords: Antarctic bottom water, Vema Channel, Romanche Fracture Zone, Kane Gap, CTD, LADCP, autonomous mooring stations

——— ХИМИЯ МОРЯ ——

УДК 551.465

ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОД ПРОЛИВА БРАНСФИЛДА В ЯНВАРЕ 2022 г.

© 2023 г. А. М. Селиверстова^{1, *}, О. А. Зуев¹, А. А. Полухин¹, А. Л. Чульцова¹, А. В. Масевич², Р. З. Мухаметьянов¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, д. 36, Москва, 117997 Россия ²Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская улица, д. 2, Севастополь, 299011 Россия *e-mail: 201219941315ann@gmail.com Поступила в редакцию 01.12.2022 г. После доработки 17.03.2023 г. Принята к публикации 27.03.2023 г.

Работа посвящена исследованию абиотических характеристик вод пролива Брансфилда в январе 2022 г. Был повторен поперечный разрез января 2020 года от Антарктического полуострова до Южных Шетландских островов, а также получены новые данные — добавлены 2 разреза в восточной и западной частях пролива. Схема течений в проливе отражает известные представления, абсолютные значения скоростей составляют до 50 см/с в северо-восточном направлении и до 35 см/с в юго-западном. В исследованном районе ярко выделяются модифицированные воды моря Беллинсгаузена (теплые и наименее соленые, с пониженными значениями общей щелочности и всех биогенных элементов), модифицированные воды моря Уэдделла (более холодные и соленые, с пониженными значениями силикатов и нитратов), а также Глубинная циркумполярная вода в слое 200—450 м (теплые и соленые, с низкими значениями растворенного кислорода и рН и повышенным содержанием фосфатов, силикатов и нитратов). В придонных водах пролива серьезных изменений в структуре не выявлено. Межгодовая изменчивость абиотических характеристик вод пролива Брансфилда выражена слабо.

Ключевые слова: Южный океан, пролив Брансфилда, термохалинная структура, течение, гидрохимическая структура, биогенные элементы

DOI: 10.31857/S0030157423040172, EDN: YBEBZI

введение

Пролив Брансфилда расположен в Атлантическом секторе Южного океана, на границе моря Уэдделла и пролива Дрейка, и отделяет Южные Шетландские острова от Антарктического полуострова. Пролив разделен на три основных бассейна — западный, центральный и восточный, с максимальными глубинами 1370, 1960 и 2750 м соответственно [19]. Бассейны отделены друг от друга подводными хребтами с глубинами, не превышающими 1000 м [28]. Водные массы пролива в основном формируются под воздействием пресноводного стока с островов и двух водных масс – модифицированной воды моря Беллинсгаузена (мБВ), заходящей в пролив с запада и прижатой к Южным Шетландским островам, и модифицированной воды моря Уэдделла (мУВ), проникающей в пролив с востока и проходящей вдоль Антарктического полуострова [17, 32]. Также в водах пролива прослеживается заток южной ветви Атлантического циркумполярного течения (АЦТ) [10], на глубине 200–450 м несущий воды модифицированной Циркумполярной глубинной воды (мЦГВ).

Для региона пролива Брансфилда характерны сильные климатические изменения, влияющие на океанографические, биологические и метеорологические условия [21, 33]. Изменения гидрохимических характеристик могут повлиять на объемы первичной продукции и фитопланктон – кормовую базу криля *Euphausia superba Dana* – что приведет к дестабилизации трофических цепей и изменения его ареала. *Е. superba* является объектом промысловой добычи в данном регионе, а также кормовой базой для всей ихтиофауны, пингвинов, китообразных и ластоногих Антарктиды [1, 11, 22, 29, 30].

Данная работа является продолжением работ января 2020 года в 79-м рейсе на НИС "Академик Мстислав Келдыш" [4, 5, 7]. Были выделены основные водные массы, участвующие в формировании структуры вод и выделены их характери-



Рис. 1. Схема расположения станций в проливе Брансфилда. Рельеф дна показан в соответствии с базой данных GEBCO2021.

стики, не только гидрологические, но и гидрохимические.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами для исследования гидрохимической структуры вод пролива Брансфилда послужили результаты 87-й экспедиции на НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Атлантическом секторе Южного океана [6] Работы в проливе велись с 21.01.2022 по 27.01.2022 и включали в себя три поперечных разреза в центральной котловине — Восточный (7 станций), Центральный (7 станций) и Западный (4 станции) (рис. 1). Центральный разрез являлся повторением разреза 2020 года [7].

Гидрологические измерения на станциях были получены с помощью CTD-зонда Idronaut OCEAN SEVEN 320Plus (Италия). Зондирующий комплекс укомплектован высокоточным температурно-скомпенсированным датчиком давления (PA–10X), 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° С, первоначальную точность 0.001°С, разрешение 0.0001°С. Два дублирующих датчика электропроводности имеют диапазон измерения от 0 до 7 См/м, первоначальная точность 0.0001 См/м, разрешение 0.00001 См/м. погружного акустического доплеровского профилографа (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler, LADCP) TRDI Workhouse Monitor частотой 300 кГц работающего в паре с судовым акустическим доплеровским профилографом (Shipborne Acoustic Doppler Current Profiler, LADCP) TRDI Ocean Surveyor-75 частотой 75 кГц. Оба профилографа производства Teledyne Technologies Inc., США. Полученные данные обрабатывались с помощью программного пакета LDEO Software ver. IX.10 [34]. Итоговая точность измерений составляла 3-4 см/с, для придонных слоев до 1-2 см/с благодаря данным "bottom track". Дополнительно были учтены приливные силы, рассчитанные с помощью программного обеспечения, описанного в [12].

Измерения течений производились с помощью

Пробы для гидрохимических анализов отбирались на станциях пластиковыми пятилитровыми батометрами комплекса ROSETTE на горизонтах, выбранных исходя из вертикального распределения температуры, солености и флуоресценции. Отбор проб и определение гидрохимических параметров велось в соответствии с принятыми методиками [8] не позднее 6–12 ч после отбора.

Растворенный кислород в морской воде анализировали с помощью модифицированного метода Винклера с использованием микробюретки Brinkman/Dosimate-765. Чувствительность метода составляет 0.02 мг/л, воспроизводимость опре-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

деления не превышает 3.4%. Расчет насыщения кислородом производили по формуле Вейсса [35].

Измерения pH выполняли при температуре $25 \pm 0.5^{\circ}$ C с помощью pH-электрода SI Analytics по PД 52.24.495-2005 "Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод. Методика выполнения измерений электрометрическим методом". Калибровка pH-электрода проводилась раз в 3 дня буферными растворами фирмы Metrohm. Точность измерения составляла 0.02. Далее pH пересчитывался в значения in situ в шкале NBS.

Анализ общей щелочности (ТА) проводился прямым титрованием в открытой ячейке соляной кислотой (0.02М). В процессе титрования пробы воды продували потоком воздуха, освобожденным от углекислого газа и аммиака. Точку эквивалентности (pH 5.4) определяли потенциометрически. Титр HCl устанавливали ежедневно по стандартному раствору соды, приготовленному весовым способом с учетом вакуумной поправки. Титрование осуществляли с помощью автотитратора SI Analytics 5000 M2 (Германия). Воспроизводимость титрования составила ± 2.6 мкмоль/кг. Введение температурной поправки на pH и расчет элементов карбонатной системы осуществлялось с помощью программы CO2SYS [24].

Определение содержания растворенного не-

органического фосфора (PO_4^-) проводилось колориметрически в соответствии с РД 52.24.382-2006 "Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом". Предел обнаружения фосфатов составлял 0.02 µМ. Воспроизводимость составила не более (при вероятности 0.95) 10%.

Определение растворенного неорганического

кремния (SiO₃⁻) проводилось по методу Королева [8] с образованием голубого молибденового комплекса. При ожидаемо высоких величинах содержания кремния, пробы предварительно разбавлялись 1 : 2 или 1 : 10 малокремневой морской водой. Предел обнаружения силикатов составлял 0.02 μ M. Воспроизводимость составила (при вероятности 0.95) не более 10%.

Определение нитритного азота (NO_2^-) проводилось колориметрически по РД 52.24.518-2008 "Массовая концентрация нитритов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил) этилендиаминадигидрохлоридом". Предел обнаружения нитрита составлял 0.02 µМ. Воспроизводимость составила (при вероятности 0.95) от 6 до 25%.

Определение нитратного азота (NO₃) проводилось по РД 52.24.380-2006 "Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после восстановления в кадмиевом редукторе". Предел обнаружения нитратов составлял 0.4 µМ, воспроизводимость определения — 7.4%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрофизическая структура и динамика вод

Распределение термохалинных параметров (рис. 2) практически однородно вдоль оси пролива при значительных градиентах поперек. Максимальные значения температуры наблюдались в поверхностном слое вдоль Южных Шетландских островов и составляли 1.27, 1.56и 1.52°С для западного, центрального и восточного разрезов. Здесь же отмечены минимумы солености – 34.22, 34.14 и 34.24 соответственно. Данные теплые и опресненные воды достигали глубин 100-150 м у берега и 50 м ближе к центру пролива. У противоположного берега, вдоль Антарктического полуострова, напротив зафиксированы минимальные значения температуры и максимальные солености для верхнего 200 м слоя: -0.66°С и 34.58, -0.62 и 34.57, -0.73°С и 34.60 для западного, центрального и восточного разрезов соответственно. Также теплая и соленая вода наблюдалась на глубинах 300-500 м на всех трех разрезах, значения в ядре достигали 1.08, 1.13 и 1.08°С для температуры и 34.73, 34.73 и 34.71 для солености. Глубже 600 м гралиенты значительно меньше, отмечено плавное понижение температуры и повышение солености до -1.65°С и 34.65 на самых глубоководных станциях. Эту водную массу можно отнести к воде пролива Брансфилда [2, 20].

Распределение скоростей течений представлено для двух разрезов – центрального и западного (рис. 3). Вдоль Южных Шетландских островов проходила узкая быстрая струя со скоростями до 50 и 23 см/с на центральном и западном разрезах соответственно. Течение на западном разрезе было слабее, но занимало больший слой, распространяясь практически до дна с ядром на глубине около 250 м. На центральном разрезе ядро располагалось в приповерхностном слое, а на глубине 500 м скорости затухали. В свою очередь, у Антарктического полуострова наблюдавшееся течение занимало только верхние 200 м, но доходило до середины пролива Брансфилда. Максимальные скорости достигали 23 см/с для центрального и 35 см/с для западного разрезов и были расположены на глубине около 100 м.

Растворенный кислород

Содержание растворенного кислорода на разрезах варьировало от 4.64 до 8.00 мл/л, степень насыщения — от 59 до 102% (рис. 4). Минимальное содержание растворенного кислорода отме-



Рис. 2. Распределение температуры (T° С) и солености (S) на разрезах в проливе Брансфилда.

чено в северо-западной части пролива на глубинах 200-450 м – 4.64–5.15 мл/л, степень насыщения здесь составляет 59–64%. Такое ядро низкого содержания растворенного кислорода объясняется затоком мЦГВ [7] и отчетливо видно на всех трех разрезах в слое от 200 до 500 м. Максимальные значения растворенного кислорода (7.50– 8.00 мл/л) приходились на верхний, 50-метровый слой в северо-западной части пролива и заглублялись до горизонтов 100–150 м в юго-восточной. Ниже слоя мЦГВ (глубже 500 м) содержание и насыщение вод кислородом схоже с слоем над верх-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 3. Распределение скоростей течений (*V*, см/с). Скорость течений вдоль пролива перпендикулярно разрезам. Положительное направление на северо-восток.

ней границей мЦГВ, что указывает на процесс обмена глубоких слоев вод пролива с вышележащими слоями. В северо-западной части пролива, вблизи Южных Шетландских островов, наблюдался заток воды из моря Беллинсгаузена, а также пресноводный островной сток; юго-восточная часть пролива подвергалась воздействию вод из моря Уэдделла.

Величины рН и общей титруемой щелочности

Как и в распределении растворенного кислорода, минимальные значения величины водородного показателя отмечены в северо-западной части разреза, на глубинах 200–450 м (7.96– 8.00 ед. NBS) (рис. 5). Максимальные значения рН также хорошо соотносились с распределением растворенного кислорода — в северо-западной, островной части разреза, максимальные значения наблюдались в верхнем 50-метровом слое, а в юговосточной, материковой части заглублялись до горизонтов 100–150 м (8.10–8.16 ед. NBS).

Величина общей титруемой щелочности на разрезах колебалась от 2372 μ M до 2433 μ M (рис. 5). Воды с минимальным значением общей титруемой щелочности прослеживались до глубины 100 метров на станциях, расположенных у островной части пролива (2372–2390 μ M). Максимум отмечен на горизонте 700 метров станции 7306 восточного разреза (2433 μ M), и на горизонте 367 м станции 7323 западного разреза (2426 μ M). В распределении общей щелочности в приостровных частях разрезов виден локальный минимум, связанный, скорее всего, с совместным влиянием мБВ и стока талых вод с островов архипелага.

Растворенные фосфор и кремний

Концентрации растворенного неорганического фосфора на разрезах находились в пределах $1.67-2.26 \mu$ M (рис. 6). Минимальные значения ($1.67-1.76 \mu$ M) отмечены в слое вод 9-30 м станции 7314 центрального разреза. Максимальные значения ($2.25-2.26 \mu$ M) — на глубинах 220– 300 метров станции 7322 западного разреза. В целом, минимальные значения растворенного фосфора наблюдались в верхнем, 50-метровом слое, однако на островных станциях разрезов содержание растворенного фосфора было ниже, чем чем на материковых.

Содержание растворенного кремния на разрезах составляло от 64.6 до 92.7 µМ (рис. 6). Горизонты 200–450 м на островных станциях, приуроченные к влиянию мЦГВ, отмечены повышенным содержанием силикатов (83.4–92.7 µМ). Воды, привнесенные из морей Беллинсгаузена и Уэдделла, под влиянием пресноводного стока с островов и материка, отличались низким содержанием кремния – около 65–70 µМ.

Минеральные формы азота

Содержание нитритного азота на разрезе составляло 0–0.17 μ M (рис. 7). Наибольшие концентрации наблюдались в верхнем 100-метровом слое (максимум – 0.17 μ M – в поверхностном слое станций 7320 и 7311). Глубже 200 метров содержание нитритов резко снижалось с 0.10 μ M до нуля.

Распределение нитратного азота на разрезе в целом схоже с распределением остальных гидрохимических параметров: выделялся максимум содержания нитратов в зоне влияния мЦГВ



Рис. 4. Содержание растворенного кислорода (О₂, мл/л) и степени насыщения кислородом (О₂, %) на разрезах в проливе Брансфилда.

(38.7 μ M на горизонте 500 метров станции 7316 и 37.7–38.5 μ M на горизонтах 160–300 м станции 7322) и минимум – в поверхностных горизонтах (23.7 и 24.0 μ M на станциях 7301 и 7294 соответственно) (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе работ 2022 г. результаты анализа термохалинной структуры и динамики вод пролива Брансфилда, хорошо согласуются с



Рис. 5. Распределение водородного показателя (pH, ед. NBS) и величин общей титруемой щелочности (TA, µM) на разрезах в проливе Брансфилда.

литературными данными [3, 13–16, 32]. В верхнем 500 м слое отчетливо выделяются три водные массы: модифицированная вода моря Уэдделла (мУВ), модифицированная вода моря Беллинсгаузена (мБВ), модифицированная циркумполярная глубинная вода (мЦГВ) [32]. Условной границей всех трех водных масс служит изотерма 0°С (рис. 9).

При этом мУВ также хорошо выделяется по динамике вод, а мБВ и мЦГВ различаются по солености. Также прослеживается ожидаемое ослаб-



Рис. 6. Распределение растворенного фосфора (PO₄, µM) и кремния (Si, µM) на разрезах в проливе Брансфилда.

ление влияния мЦГВ с запада на восток и схожее ослабление мУВ в обратном направлении. Изменений в структуре мБВ вдоль пролива не наблюдалось. Нижележащий слой — Глубинные воды пролива Брансфилда (ГБВ) — слабо стратифицирован и практически однороден по термохалин-

ным параметрам. Данные воды, в основном, относятся к морю Уэдделла, принесены Антарктическим склоновым течением и частично сформированы уже в самом проливе [18].

Полноценно проанализировать структуру течений невозможно ввиду отсутствия данных на

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 7. Распределение нитритного азота (NO₂, µM) на разрезах в проливе Брансфилда.

восточном разрезе, но известные течения Брансфилда и Антарктическое прибрежное течение отчетливо выделяются на обоих имеющихся разрезах. Скорости и структура центрального разреза очень близки к предыдущим данным [23], а сделанный впервые западный разрез показывает более сильное проникновение вод мУВ на юг, чем считалось ранее [21]. Подробнее динамика вод обсуждается в работе [15].

Распределение гидрохимических параметров в проливе Брансфилда имеет высокую пространственную неоднородность, отражает взаимодействие водных масс, и в целом повторяет распределение водных масс и их характеристики, полученные в 2020 г. (рис. 10) [7]. В данной работе, в отличие от работы 2020 г., рассмотрены три поперечных разреза, что позволило оценить пространственную изменчивость термохалинных и гидрохимических параметров в проливе.

Сравнивая результаты, полученные за две экспедиции, можно заметить, что гидрохимические параметры водных масс мУВ и ГБВ отличаются достаточной стабильностью: величины всех показателей не слишком изменились за два года, несмотря на то, что модифицированная вода моря Уэдделла прослеживалась в верхнем деятельном, довольно динамичном, слое. Некоторые различия отмечены только в содержании растворенного кремния — в 2022 году его средняя величина была ниже, чем в 2020 (78 µM в 2020 г. и 75 µM в 2022 г. для мУВ; 85 µM в 2020 г. и 80 µM в 2022 г. для ГБВ).

Воды мБВ и мЦГВ различаются по гидрохимическим характеристикам в 2020 и 2022 гг. Содержание растворенного кислорода и степень его насыщения в 2022 г. уменьшились (с 7.63 мл/л и 98% насыщения до 7.33 мл/л и 93% насыщения для мБВ и с 5.96 мл/л и 74% насыщения до 5.19 мл/л и 66% насыщения для мЦГВ), как и содержание растворенного кремния (с 84 до 74 μ M в мБВ и с 99 до 85 μ M в мЦГВ). Среднее содержание нитратного азота, напротив, повысилось с 27 до 30 μ M (мБВ) и с 33 до 35 μ M (мЦГВ). Величины рH, общей щелочности и нитритного азота остались практически неизменными. Такие различия по годам в случае мБВ можно объяснить ее залегани-



Рис. 8. Распределение нитратного азота (NO₃, µM) на разрезах в проливе Брансфилда.

ем на небольших глубинах пролива и, как следствие, большей подверженностью продукционно-деструкционным процессам. мЦГВ же в ходе обеих экспедиций наблюдалась очень локально и, возможно, разница между гидрохимическими показателями связана с недостаточно частым расположением станций и горизонтов отбора для полноценного изучения данной структуры вод.

По данным представленного исследования четко выделяется заток южной ветви АЦТ и привнесенной им модифицированной водной массы ЦГВ, проходящий на глубине 200—450 м вдоль Южных Шетландских островов. Он характеризуется низкими значениями растворенного кислорода, пониженным значением водородного показателя, повышенным содержанием растворенного фосфора, кремния и нитратного азота, повышенной температурой и соленостью (табл. 1). Наиболее ярко признаки присутствия мЦГВ отмечены на западном разрезе.

В верхнем слое вод пролива Брансфилда хорошо заметно присутствие двух водных масс – вод, пришедших из морей Беллинсгаузена и Уэдделла. Воды моря Беллинсгаузена, теплые и наименее



Рис. 9 θ,S-кривые в проливе Брансфилда. Серыми линиями обозначена потенциальная плотность на поверхности моря. Черными прямоугольниками выделены границы соответствующих водных масс.



Рис. 10. Диаграммы сравнения величин гидрохимических параметров по водным массам за 2020 и 2022 гг, где мБВ – модифицированная вода моря Беллинсгаузена, мУВ – модифицированная вода моря Уэдделла, мЦГВ – модифицированная Циркумполярная глубинная вода, ГБВ – глубинная вода пролива Брансфилда.

соленые, отличаются низкими значениями общей щелочности (что может говорить о том, что свою долю в этом притоке имеет и сток талых вод с Южных Шетландских островов), растворенного фосфора, кремния и нитратного азота. Воды, пришедшие из моря Уэдделла, более холодные и соленые, отличаются пониженными значениями кремния и нитратов. Также, по структуре распре-

	• • •				•					
Водная масса		T, ℃	S, ‰	О ₂ , мл/л	pН	ΤΑ, μΜ	PO ₄ , μM	Si, µM	NO ₃ , μM	NO ₂ , μM
	Среднее	0.81	34.37	7.33	8.10	2392	1.91	74.1	29.9	0.15
. FD	Ст. откл.	0.38	0.10	0.59	0.03	10	0.13	4.8	2.9	0.01
MDD	Минимум	0	34.11	5.52	8.02	2372	1.67	65.2	23.8	0.12
	Максимум	1.73	34.50	8.00	8.16	2422	2.20	85.4	37.7	0.17
	Среднее	-0.51	34.59	7.16	8.08	2404	2.05	75.4	31.6	0.10
VD	Ст. откл.	0.21	0.05	0.58	0.03	5	0.08	5.6	2.7	0.03
муВ	Минимум	-0.80	34.40	6.02	8.01	2393	1.91	64.6	26.2	< 0.02
	Максимум	0	34.68	7.78	8.14	2418	2.19	90.7	36.3	0.13
	Среднее	0.70	34.68	5.20	8.00	2410	2.17	84.9	35.4	0.04
	Ст. откл.	0.35	0.03	0.43	0.02	6	0.05	3.5	1.0	0.03
мці в	Минимум	0	34.60	4.64	7.90	2401	2.12	81.3	33.6	< 0.02
	Максимум	1.18	34.77	5.81	8.00	2426	2.25	92.7	36.8	0.07
	Среднее	-1.06	34.63	6.56	8.03	2408	2.15	80.2	34.7	0.02
FFD	Ст. откл.	0.22	0.01	0.25	0.02	6	0.07	2.7	1.5	0.02
IDB	Минимум	-1.65	34.57	6.20	7.99	2400	1.80	75.1	32.1	< 0.02
	Максимум	-0.80	34.65	7.48	8.10	2416	2.23	82.9	36.6	0.12

Таблица 1. Распределение гидрохимических параметров для водных масс пролива

Примечание. *Т* – температура, S – соленость, O₂ – растворенный кислород, pH – водородный показатель, TA – общая титруемая щелочность, PO₄ – фосфаты, Si – силикаты, NO₃ – азот нитратов, NO₂ – азот нитритов. мБВ – модифицированная вода моря Беллинсгаузена, мУВ – модифицированная вода моря Уэдделла, мЦГВ – модифицированная Циркумполярная глубинная вода, ГБВ – Глубинная вода пролива Брансфилда.

деления гидрохимических параметров, можно заметить, что первая водная масса сильно прижата к берегам Южных Шетландских островов и распространяется до глубины 50 м, тогда как вторая отходит достаточно далеко от Антарктического полуострова и заглубляется до 150–200 м.

Слой вод ниже мУВ и мБВ — Глубинная вода пролива Брансфилда — слабо стратифицирован, вертикальное распределение рассмотренных параметров здесь отражает простую структуру вод (без выраженных экстремумов) и имеет тенденцию к увеличению или уменьшению согласно классическим представлениям [9].

Сравнивая результаты работ 2020 и 2022 гг. можно заключить, что временная изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик выражена незначительно. Слабые отличия отмечаются в концентрациях биогенных элементов, что может быть вызвано в верхнем деятельном слое продукционно-деструкционными процессами биологической компоненты экосистемы вод пролива Брансфилда, связанными с формированием здесь молоди криля Euphasia superba Dana [29], а в слое мЦГВ – с гидрологическими процессами, в частности апвеллингами [25], и морфологией дна [31] на шельфе Антарктиды. Наблюдаемая изменчивость гидрологических характеристик водных масс, особенно вод Арктического циркумполярного течения [26], может яв-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ляться результатом наблюдаемых климатических изменений в Южном океане, вызванных, в первую очередь, таянием ледникового щита [25, 27].

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания ИО РАН FMWE-2021-0016, при поддержке гранта РНФ 21-77-20004 (анализ судовых измерений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Кашин С.В., Антипов Н.Н., Чистяков И.А. и др. Межгодовая изменчивость структуры и характеристик вод пролива Брансфилд по данным наблюдений ААНИИ // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 18–24 апреля 2021 г. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. С. 81–82. https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-3-9.
- 3. *Морозов Е.Г.* Течения в проливе Брансфилда // Докл. Акад. наук. 2007. Т. 415. № 6. С. 823–825.
- 4. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А. и др. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019—март 2020 г.) // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1086–1088.
- 5. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического секто-

ра Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 823–825.

 Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научноисследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825– 827.

https://doi.org/10.31857/S003015742205015X

- Полухин А.А., Морозов Е.Г., Тищенко П.П. и др. Структура вод пролива Брансфилда (Антарктика) в январе 2020 г.: гидрофизические, оптические и гидрохимические особенности // Океанология. 2021. Т. 61. №. 5. С. 724–736. https://doi.org/10.31857/S0030157421050105
- Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О.К. и др. М.: ИОАН СССР, 1992. 198 с.
- 9. Степанов В.Н. Мировой океан: динамика и свойства вод. М.: Знание, 1974. 256 с.
- 10. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // Океанология. 2018. Т. 58. №. 4. С. 541–555.
- Capella J.E., Quetin L.B., Hofmann E.E. et al. Models of the early life history of Euphausia superba – Part II. Lagrangian calculations // Deep-Sea Res. 1992. V. 39. P.1201–1220.
- 12. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
- 13. *Damini B.Yu., Kerr R., Dotto T.S. et al.* Long-term changes on the Bransfield Strait deep water masses: Variability, drivers and connections with the northwestern Weddell Sea // Deep-Sea Res. Part I. 2022. V. 179. P. 103667.

https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103667

- Dorschel B., Gutt J., Huhn O. et al. 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.
- 15. Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // Water. 2022. V. 14. № 20. P. 3193
- Garcia M., Castro C., Rios A. et al. Water Masses and Distribution of Physico-chemical Properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral Summer 1995/96 // Deep-Sea Res. Part II. 2002. V. 49. № 4–5. P. 585–602.
- García M., López O., Sospedra J. et al. Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer // Annales Geophysicae. 1994. V. 12. № 9. P. 856–867.
- Gordon A., Mensch M., Dong Z. et al. Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and central basins // J. Geophys. Res. Oceans. 2000. V. 105. № C5. P. 11337– 11346.
- Gordon A.L., Nowlin W.D. The basin waters of the Bransfield Strait // J. Phys. Oceanogr. 1978. V. 8. № 2. P. 258–264.
- Hofmann E.E., Klinck J.M., Lascara C.M. et al. Water Mass Distribution and Circulation West of the Antarctic Peninsula and Including Bransfield Strait // Foun-

dations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula. Antarct. Res. Ser. 1996. V. 70. P. 61–80.

- 21. *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
- 22. *Kasyan V.V., Bitiutskii D.G., Mishin A.V. et al.* Composition and Distribution of Plankton Communities in the Atlantic Sector of the Southern Ocean // Diversity. 2022. V. 14. P. 923. https://doi.org/10/3390/d14110923
- 23. *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
- 24. *Lewis E.R., Wallace D.W.R.* Program developed for CO2 system calculations. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem (ESS-DIVE)(United States), 1998. CDIAC-105.
- 25. *Peck V.L., Allen C.S., Kender S. et al.* Oceanographic variability on the West Antarctic Peninsula during the Holocene and the influence of upper circumpolar deep water // Quatern. Sci. Revs. 2015. V. 119. P. 54–65.
- 26. *Rubin S.I.* Carbon and nutrient cycling in the upper water column across the Polar Frontal Zone and Antarctic Circumpolar Current along 170 W //Global Biogeochemical Cycles. 2003. V. 17. № 3.
- Rye C.D., Marshall J., Kelley M. et al. Antarctic glacial melt as a driver of recent Southern Ocean climate trends // Geophys. Res. Lett. 2020. 47. e2019GL086892. https://doi.org/10.1029/2019GL086892
- Sangrà P., Gordo C., Hernàndez-Arencibia M. et al. The Bransfield current system // Deep-Sea Res. Part I. 2011. V. 58. № 4. P. 390–402.
- Siegel V, Watkins J.L. Distribution, biomass and demography of Antarctic krill, Euphausia superba // In: Siegel V. (Ed.) Biology and ecology of Antarctic krill. Advances in Polar Ecology. Springer, Cham., 2016. P. 21–100.
- 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.
- St-Laurent P., Klinck J.M., Dinniman M.S. On the role of coastal troughs in the circulation of warm Circumpolar Deep Water on Antarctic shelves // J. Phys. Oceanogr. 2013. V. 43. № 1. P. 51–64. https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0237.1
- 32. *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.
- Vaughan D., Marshall G., Connolley W. et al. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula // Climatic change. 2003. V. 60. № 3. P. 243–274.
- 34. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Acoustic Doppler Current Profiler: Bottom track and inverse solution // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2002. V. 19. № 5. P. 794–807.
- 35. *Weiss R.F.* The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // Deep-Sea Res. 1970. V. 17. P. 721–735.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

The Hydrological and Hydrochemical Structure of the Waters of the Bransfield Strait in January 2022

A. M. Seliverstova^{1, #}, O. A. Zuev¹, A. A. Polukhin¹, A. L. Chultsova¹, A. V. Masevich², R. Z. Mukhametnyanov¹

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia ²Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia [#]e-mail: 201219941315ann@gmail.com

The work is devoted to the study of the abiotic characteristics in the waters of the Bransfield Strait in January 2022. The cross-section of January 2020 was repeated from the Antarctic Peninsula to the Southern Shetland Islands, as well as new data – 2 cross-sections in the eastern and western parts of the Strait. The scheme of currents in the Strait reflects modern knowledge, absolute values have been measured up to 50 cm/s in the northeast direction and up to 35 cm/s in the southwest. In the studied area, the modified waters of the Sea of Bellingshausen are clearly distinguished (warm and least salted, with reduced values of total alkalinity and all nutrients), the modified waters of the Wedell Sea (colder and salty, with reduced values of silicates and nitrates), as well as Circumpolar Deep Water in layer 200–450 m (warm and salty, with low values of dissolved oxygen and pH and an increased content of phosphates, silicates and nitrates). In the bottom waters of the abiotic characteristics of the waters of the Bransfield Strait is poorly expressed, nevertheless it can serve as a marker of climatic changes in the Southern Ocean.

Keywords: Southern Ocean, Bransfield Strait, thermohaline structure, course, hydrochemical structure, nutrients ——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 581.132:574.583

ПЕРВИЧНАЯ И БАКТЕРИАЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛДА (АНТАРКТИКА) В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. С. А. Мошаров^{1, 2,} *, И. В. Мошарова^{1, 3}, Д. И. Фрей¹, А. М. Селиверстова¹, А. А. Латушкин⁴, С. В. Гонтарев¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия ²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия ³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Биологический факультет, Москва, Россия ⁴Морской гидрофизический институт Российской академии наук, Севастополь, Россия

*e-mail: sampost@list.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г. После доработки 06.02.2023 г. Принята к публикации 16.02.2023 г.

В работе представлены результаты измерений пространственного распределения основных параметров первичной продуктивности в проливе Брансфилда антарктическим летом. Интегральная первичная продукция в проливе варьировала от 435 до 741 мгС/м² в сутки. Доля первичной продукции в общей продукции фито- и бактериопланктона в верхнем 10-м слое составляла 82–91%. Потенциальная фотосинтетическая способность (F_v/F_m) была на высоком уровне в пределах эвфотического слоя (0.418–0.749) во всем районе. Продукционные параметры в двух основных водных массах в проливе не различались. Фотосинтетическая эффективность (соотношение ассимиляционного числа и относительной скорости электронного транспорта, AЧ/rETR) варьировала в разных субрегионах района исследований почти в шесть раз.

Ключевые слова: Первичная продукция, гетеротрофная бактериальная продукция, активная флуоресценция хлорофилла "а", пролив Брансфилда, Антарктика DOI: 10.31857/S0030157423040135. EDN: YMODMP

введение

Пролив Брансфилда представляет собой относительно глубокий и узкий пролив между Южными Шетланлскими островами и Антарктическим полуостровом. Пролив соединяет море Беллинсгаузена на западе, море Уэдделла на востоке и море Скотия на севере, однако водообмен в глубинных слоях между указанными акваториями ограничен, поскольку пороги между ними достаточно мелководны [16]. Гидрография пролива неоднократно изучалась с начала 20-го века [14]. Верхний слой океана в этом регионе представлен двумя основными водными массами: модифицированной водой, распространяющейся из моря Беллинсгаузена (TBW), относительно более теплой и менее соленой, и модифицированной водой моря Уэдделла (TWW), относительно более холодной и более соленой [19, 43]. ТВW занимает северную часть пролива и распространяется в северо-восточном направлении вдоль Южных Шетландских островов, TWW наблюдается в южной части пролива и распространяется в юго-западном направлении вдоль Антарктического полуострова [39].

Существующие данные показывают, что в проливе Брансфилда наблюдается циклоническая циркуляция [39, 45]. Главной особенностью циркуляции вод в проливе является наличие быстрого и узкого течения Брансфилда, направленного на северо-восток вдоль Южных Шетландских островов. Важным аспектом динамики вод в проливе являются приливные течения [46], которые, в частности, приводят к генерации интенсивных внутренних волн в некоторых районах пролива [26].

Для значительной части Южного океана отмечен феномен высокой концентрации биогенных элементов и низкого содержания хлорофилла. Считается, что относительно низкая первичная продукция при высоком содержании биогенных элементов обусловлена в основном ограничениями по доступности света и железа [13]. Причем влияние этих двух факторов на фотосинтетическую активность фитопланктона взаимосвязано на физиологическом уровне. Ограничение количества железа вызывает нарушение синтеза пигментов и неэффективное функционирование системы транспорта электронов, снижая выход фотосинтеза на единицу хлорофилла [12]. Эти на-



Рис. 1. Район исследований и расположение станций.

рушения фотосинтетических процессов сильно снижают способность фитопланктона адаптироваться к условиям низкой освещенности [10, 18].

Существует представление, что в океанических районах, где сильно влияние TBW, особенно вокруг Южных Шетландских островов, наблюдается более высокая концентрация хлорофилла "а" (хл "а") по сравнению с водами под влиянием TWW в летний период [24, 30, 38]. Но такое горизонтальное распределение хлорофилла формируется не каждый год [21].

Фитопланктон и гетеротрофные бактерии являются ключевыми группами в основании пищевой сети, которые преобразуют растворенные биогенные элементы в органическое вещество и обеспечивают продукционный потенциал более высоких трофических уровней, таких, как мезозоопланктон и рыбы. Формирование биомассы фитопланктона и бактериопланктона служит основанием для двух вариантов пищевых цепей пастбищной цепи и микробной петли. Согласно концепции "микробной петли" [3, 11], выделяемое фитопланктоном растворенное органическое вещество (РОВ), практически не используемое гетеротрофными организмами, потребляется гетеротрофными бактериями, которые служат пищей для простейших – гетеротрофных нанофлагеллят и циллиат. Таким образом, растворенная часть первичной продукции включается в пищевую цепь. Кроме автохтонного POB, гетеротрофные бактерии потребляют также и аллохтонное POB. Доминирование продукции гетеротрофных бактерий может приводить к более низкой эффективности пищевой сети и более низкой продукции высших трофических уровней.

Целью данной работы было исследовать особенности первичной продуктивности, а также баланса между первичной и бактериальной продукцией в Антарктике в условиях сильных градиентов гидрофизических параметров, определяемых двумя различающимися водными массами в проливе Брансфилда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований, гидрофизические и гидрохимические измерения. Исследования проводили в ходе 87 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" в проливе Брансфилда (Антарктика) в летний период южного полушария с 21 января по 1 февраля 2022 г. [33] Пробы воды отбирали с помощью пластиковых батометров Нискина в составе комплекса General Oceanic GO1018 на 16 станциях. Было сделано три поперечных разреза (разрез 1 – станции 7294–7305, разрез 2 – станции 7308– 7314, разрез 3 – станции 7319–7323) и одна станция восточнее пролива (ст. 7356) (рис. 1). Профили солености и температуры на станциях были получены с помощью СТД-зонда Idronaut Ocean Seven 320р в составе комплекса. Горизонты отбора проб (5—7 горизонтов на станцию) выбирали по следующей схеме: поверхность, слой максимума флуоресценции, нижняя граница эвфотического слоя и промежуточные горизонты.

Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР, 400–700 нм) на поверхности моря и в толще воды измеряли с использованием автономного зондирующего измерителя "Кондор". Эвфотическая зона определялась как слой, ограниченный глубиной проникновения 1% поверхностной ФАР.

Потенциальную плотность воды рассчитывали по данным температуры, солености и давления, полученным по результатам СТД-зондирований. Глубина верхнего перемешанного слоя (ВПС) оценивалась как глубина, на которой градиент плотности был равен или превосходил 0.02 кг/м³ [9].

Определение содержания растворенного неорганического фосфора (фосфаты) проводилось колориметрически в соответствии с [7]. Определение растворенного неорганического кремния (силикатов) проводилось по методу Королева [1] с образованием голубого молибденового комплекса. При ожидаемо высоких величинах содержания кремния, пробы предварительно разбавлялись 1 : 2 или 1 : 10 малокремниевой морской водой. Определение нитратного азота (нитраты) проводилось по [6].

Определение продукционных параметров фитопланктона. Определение скорости первичной продукции (ПП) проводили на 7 станциях (5 горизонтов на каждой) экспериментально радиоуглеродным методом [40]. Во флаконы с пробами воды объемом 50 мл был добавлен раствор NaH¹⁴CO₃. Экспонирование флаконов осуществляли по методу имитации световых и температурных условий в оригинальном лабораторном инкубаторе с регулируемой светодиодной подсветкой [4]. Поддержание температуры инкубации, соответствующей температуре в точке отбора проб, осуществляли с помощью лабораторного охладителя HAILEA-100 и микропомпы для циркуляции воды. Уровень освещенности для каждого флакона, также соответствующей освещенности в точке отбора проб, задавался регулируемой величиной постоянного тока, протекающего через светодиод [4].

Условия освещенности в инкубаторе устанавливались для каждого измерения следующим образом. Учитывая параболическую зависимость интенсивности освещения от времени суток и величину максимальной (полуденной) интенсивности ФАР, измеренной при пробоотборе, был рассчитан средний за светлое время суток уровень ФАР. В период исследований эти значения составляли 300–700 мкмоль фотонов/м² в сек. Эти значения устанавливались в инкубаторе для поверхностных проб. Для задания освещенности проб с других горизонтов использовались значения доли ФАР, достигавшей соответствующих горизонтов, рассчитанных при оптическом зондировании водной толщи с помощью комплекса "Кондор". Суточные значения ПП были рассчитаны по экспериментально полученным значениям часовой скорости ПП (мгС/м³ в час) и длины дня для данной широты и периода времени (17 ч).

После инкубации в течение 3 часов пробы отфильтровывали через мембранные фильтры "Владипор" (0.45 мкм). Радиоактивность исходного раствора и фильтров определяли с помощью жидкостного сцинтилляционного счетчика Triathler (Hidex, Финляндия). Ассимиляционное число (удельная первичная продукция, АЧ, мг С/мг хл в ч) было рассчитано путем нормирования ПП на отдельных горизонтах по соответствующей концентрации хл "а". Долю феофитина определяли как отношение концентрации феофитина к сумме концентраций хл "а" и феофитина. Этот параметр рассматривался как показатель состояния хлорофилла с точки зрения продукционного потенциала. Как показано в работе [5], доля феофитина менее 40% соответствует активному состоянию фитопланктона с высоким продукционным потенциалом.

Концентрацию хл "а" в воде измеряли методом флуоресценции ацетонового экстракта [25]. Пробы воды (500 мл) отфильтровывали через стекловолоконные фильтры Whatman GF/F под вакуумом не более 0.2 атм. Для экстракции хл "а" фильтры помещали в пробирки с ацетоном (90%) и выдерживали в темноте при температуре +4°C в течение 24 ч. Затем флуоресценцию экстракта измеряли с помощью флуориметра МЕГА-25 до и после подкисления 1 н HCl (коррекция на феофитин). Флуориметр был предварительно откалиброван с использованием стандарта хлорофилла (Sigma). Концентрация хл "а" и феофитина была рассчитана согласно [23].

Активная флуоресценция хл "а" была измерена с помощью ультрачувствительного РАМ-флуориметра WATER-РАМ (Walz, Германия). Измерение соотношения интенсивности флуоресценции хлорофилла для фитопланктона, выдержанного в темноте, при слабой вспышке возбуждающего света (минимальный выход флуоресценции, F_0) и при насыщающем фотосинтез возбуждающем свете (максимальный выход флуоресценции, F_m) позволяет определить максимальную эффективность первичных процессов фотосинтеза (F_v/F_m), которая рассчитывается по формуле $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ [20]. Относительная переменная флуоресценция $F_v/F_m - 50$ максимальный квантовый выход фотосистемы II, служащий мерой потенциальной фотосинтетической способности фито-

планктона. Измерения флуоресцентных параметров фотосинтетической системы фитопланктона F_0 и F_v/F_m были выполнены в пробах, выдержанных в темноте в течение часа. Для оценки активности первичных процессов фотосинтеза (конвертация солнечной энергии в химически связанную) определялась величина rETR (относительная скорость электронного транспорта в фотосистеме II) при задании освещенности, соответствующей точке отбора пробы:

$$rETR = Y \times E \times 0.5, \tag{1}$$

где Y – фотохимическая эффективность фотосистемы II при определенной освещенности, Е – уровень актиничного (соответствующего природному в месте отбора) света (мкмоль фотонов/м² в сек) и фактор 0.5 – величина, учитывающая распределение фотонов между фотосистемой I и фотосистемой II.

Фотохимическую эффективность фотосистемы II для свето-адаптированных проб рассчитывали согласно [20]:

$$Y = \Delta F / F'_m = (F'_m - F_t) / F'_m,$$
 (2)

где F_t – стационарная флуоресценция для светоадаптированных проб, F'_m – максимальная флуоресценция для свето-адаптированных проб.

Определение микробиологических параметров. Определения численности (ЧБ), биомассы (ББ) и продукции бактериопланктона (ПБ) выполняли на 6 станциях (4-5 горизонтов на каждой). Пробы морской воды сразу после их отбора фиксировали 38% формальдегидом (предварительно профильтрованным через мембранный фильтр с диаметром пор 0.2 мкм (Nucleopor)) до конечной концентрации в пробе 1% и хранили максимум в течение суток в темноте при температуре 4°С. Численность и размеры бактериальных клеток определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием флуоресцентного красителя 3.6-bis(dimethylamino)acridine (акридиновый оранжевый) и черных ядерных фильтров с диаметром пор 0.2 мкм (Osmonics, США) [22, 36, 37]. Препараты для микроскопирования изготовляли с применением низкофлуоресцирующего иммерсионного масла (Olimpus, Япония). Бактерий учитывали с помощью микроскопа МикМед-3 ЛЮМ LED, оснащенного цифровой камерой Touptek Photonics FMA 050 (Китай) и персональным компьютером. На каждом препарате считали не менее 200 и измеряли не менее 50 клеток бактерий. Сырую биомассу бактерий вычисляли путем умножения их численности на средний объем клеток. Содержание углерода в бактериальных клетках (С, фг С/кл) рассчитывали с использованием аллометрического уравнения, наиболее подходящего для клеток, окрашенных акридиновым оранжевым: $C = 120V^{0.72}$ [34, 37].

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

Скорость роста и продукцию бактериопланктона (ПБ) определяли в "живых" пробах морской воды методом "разбавления" по изменению их численности в изолированных пробах воды, инкубируемых в течение 24–48 ч в инкубаторе при

воды методом разоавления по изменению их численности в изолированных пробах воды, инкубируемых в течение 24–48 ч в инкубаторе при температуре *in situ*. Для устранения бактериотрофных организмов пробы морской воды разбавляли 1 : 10 морской водой, взятой из места отбора пробы и профильтрованной через мембранный фильтр с диаметром пор 0.20 мкм [15]. Эксперименты проводили в трехкратной повторности. Удельную скорость роста численности бактерий (ц. ч⁻¹) вычисляли по формуле:

$$\mu = (\ln N_t - \ln N_o)/t, \qquad (3)$$

где N_o и N_t — численности бактерий в начале и в конце инкубации, t — время инкубации, часы в разбавленных пробах воды. Продукцию бактериопланктона (P_B , мг C/м³ в сут) рассчитывали как произведение удельной скорости роста и биомассы бактерий в неразбавленной морской воде. Деструкцию органического вещества рассчитывали, принимая, что отношение продукции бактерий к их рациону составляет 0.27 [31].

Интегрированные по глубине значения были рассчитаны по методу трапеции. Средневзвешенные значения параметров для водной толщи рассчитывали путем интегрирования значений по глубине и делением на значение глубины. Значения средних величин представлены с указанием стандартного отклонения (±SD).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрофизические и гидрохимические условия. Район исследований охватывал всю акваторию пролива Брансфилда (северный, центральный и южный сектора) и района восточнее пролива. Обе основные водные массы в проливе (TBW и TWW) хорошо просматриваются на профилях температуры и солености (рис. 2). Можно видеть, что в южной части пролива (зеленые кривые на рис. 2) воды более однородны по глубине, температура здесь колеблется от -0.7 до 0.3°C, соленость от 34.50 до 34.65. Напротив, в зоне потока вод ТВW наблюдается многослойная вертикальная структура. В то время как сверху мы видим сильно распресненный слой (соленость опускается до 34.2), на глубине от 300 до 500 метров явно прослеживается слой модифицированной циркумполярной воды с максимумом солености 34.71 и локальным максимумом температуры (1.1°C).

По результатам анализа TS-графиков, основанных на CTD-данных, было определено положение станций относительно двух водных масс. Станции 7294, 7296 и 7308 находились в водной массе TWW. Станции 7356, 7297, 7310 и 7319 предположительно находились в зоне смешения вод-



Рис. 2. Термохалинная структура основных водных масс в проливе Брансфилда: TBW (фиолетовые линии) и TWW (зеленые линии).

ных масс TWW и TBW. Остальные станции находились в водной массе TBW.

Для оценки океанографических особенностей водных масс в пределах пролива, станции были сгруппированы в четыре субрегиона, при этом в каждой из двух водных масс отдельно рассматривались районы в восточной и средние частях пролива (разрезы 1 и 2, соответственно) (табл. 1). В районе ТWW была самая низкая температура поверхности воды ($0.03 \pm 0.31^{\circ}$ С) и более высокая соленость (34.54 ± 0.01). И наоборот, район TBW был связан с более высокой температурой воды ($1.29 \pm 0.28^{\circ}$ С) и более низкой соленостью ($34.32 \pm$

 \pm 0.10). Ст. 7356, расположенная восточнее пролива, характеризовалась промежуточными значениями температуры и солености, отражая смешение двух водных масс.

В отличие от гидрофизических параметров, содержание основных биогенных элементов немного различалось не только в разных водных массах, но и в разных субрегионах в каждой из них (табл. 1). Средние поверхностные концентрации нитратов, фосфатов и кремния были высокими (>27, >1,7 и >72 μ M, соответственно) во всем районе исследований. Тем не менее, содержание фосфатов в TBW было ниже, чем в TWW (1.80 и

Таблица 1. Средние поверхностные значения и стандартные отклонения (в скобках) гидрофизических и гидрохимических параметров для четырех субрегионов

Параметр	TBW-1	TBW-2	TWW-1	TWW-2	ст. 7356
Температура, °С	1.24 (0.26)	1.35 (0.37)	0.01 (0.23)	0.06 (0.53)	0.88
Соленость	34.35 (0.07)	34.28 (0.17)	34.55 (0.01)	34.52 (0.01)	34.41
Нитраты, μМ	27.63 (3.53)	27.06 (0.85)	27,15 (3,04)	28.63 (2.78)	н/д
Фосфаты, μМ	1.86 (0.08)	1.77 (0.09)	1.93 (0.03)	1.92 (0.01)	н/д
Кремний, μМ	75.22 (7.13)	72.52 (3.04)	72.40 (1.56)	74.48 (8.84)	н/д
N : P	14.8 (2.2)	15.3 (0.6)	14.0 (1.4)	14.6 (1.5)	н/д

Примечание. TBW-1 — модифицированная вода моря Беллинсгаузена в восточной части пролива (разрез 1), TBW-2 — модифицированная вода моря Беллинсгаузена в средней части пролива (разрез 2), TWW-1 — модифицированная вода моря Уэдделла в восточной части пролива (разрез 1), TWW-2 — модифицированная вода моря Уэдделла в средней части пролива (разрез 2).

ПЕРВИЧНАЯ И БАКТЕРИАЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ

Станции	Хл _о	Хл _{эв}	Хл _{инт}	Хл _{макс} /Хл _{ср}	ГХМ	Φ, %
		1	Разрез 1			
7294	0.655	55	67	1.16	25	24
7296	0.783	48	52	1.52	0	23
7297	0.965	63	66	1.61	25	19
7299	0.731	39	49	1.56	0	24
7301	0.394	22	23	1.77	0	42
7305	0.687	36	54	1.25	0	34
7306	0.398	20	37	1.88	0	34
			Разрез 2	· ·		
7308	0.750	61	105	1.17	27	24
7310	0.504	26	33	2.13	0	45
7311	0.687	35	59	1.45	0	41
7314	0.861	57	57	1.23	35	35
7316	1.281	53	62	1.98	0	29
			Разрез 3			
7319	0.635	25	35	2.12	0	41
7320	0.632	51	59	1.78	40	31
7323	0.679	20	58	1.70	50	34
		Рай	он восточнее пр	олива		
7356	1.409	46	71	2.83	0	32
			. 2			

Таблица 2. Распределение хлорофилла "а" в проливе Брансфилда

Примечание. Хл_о – концентрация хл "а" на поверхности, мг/м³; Хл_{эв} – содержание хл "а" в эвфотическом слое, мг/м²; Хл_{инт} – общее содержание хл "а" в водном столбе, мг/м²; Хл_{макс}/Хл_{ср} – степень выраженности хлорофильного максимума, ГХМ – глубина хлорофильного максимума, м; Ф – средняя для эвфотического слоя доля феофитина в суммарном количестве хл "а" и феофитина, %.

1.93 μ M, соответственно). Содержание кремния варьировало в пределах обоих водных масс, а содержание нитратов было выше в субрегионе TWW-2 (28.63 μ M) по сравнению с другими субрегионами (27.06–27.63 μ M).

Глубина эвфотического слоя в районе исследований варьировала от 61 до 93 м. Наиболее глубоким эвфотический слой был в глубоководной области северо-восточной части района на станциях 7356 и 7301, наименьшим — в прибрежной области этой же части района на станциях 7305 и 7314.

Распределение хлорофилла "а". Концентрация хл "а" на разных глубинах эвфотического слоя варьировала от 0.11 до 1.41 мг/м³ (в среднем 0.65 \pm \pm 0.30 мг/м³). Значения поверхностных концентраций хл "а"изменялись в пределах от 0.39 до 1.41 мг/м³. Максимальные значения были на поверхности на ст. 7356 и 7316 (1.41 и 1.28 мг/м³, соответственно). Хлорофильный максимум наблюдался на поверхности на 9 станциях и в слое 25– 50 м – на 6 станциях (табл. 2).

Доля хл "а", сосредоточенного в слое максимума, от общего содержания этого пигмента в

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

водной толще существенно варьирует на разных станциях. Для количественной характеристики выраженности пика концентрации хлорофилла использовалось отношение величин концентрации хл "а" в слое максимума и средней концентраций для столба воды на конкретной станции (Хл_{макс}/Хл_{ср}). В районе исследований это отношение варьировало от 1.16 до 2.83. Наиболее выраженным хлорофильный максимум был на ст. 7356, где поверхностное содержание хл "а" превышало среднее для столба значение почти в три раза. На станциях, расположенных в проливе, эта величина была максимальной (более чем в два раза) на ст. 7310 и 7319. Отсутствие выраженного хлорофильного максимума, т.е. равномерное распределение хл "а" по вертикали наблюдалось на ст. 7294 и 7308.

Вертикальное распределение значений концентрации хл "а" на всех рассматриваемых станциях показано на рис. За. Максимальные наблюдаемые значения для конкретных слоев водной толщи постепенно снижаются с глубиной. Как видно из рисунка, в верхнем 50-м слое максимальные среди всех станций значения концен-



Рис. 3. Вертикальное распределение параметров первичной продуктивности: (а) хлорофилл "а", (б) первичная продукция.

трации хл "а" достигали более чем 1 мг/м³. Минимальные, в свою очередь, не опускались ниже 0.40 мг/м³. В слое 50–100 м концентрация хл "а" варыровала от крайне низких значений (0.025 мг/м³) до умеренных (0.62 мг/м³). Ниже 100 м эта величина варьировала от 0.01 до 0.21 мг/м³.

Концентрация хл "а" на поверхности для большинства станций в проливе Брансфилда согласуется с его интегральным содержанием в столбе воды 0–200 м (рис. 4). Отклонения от этой зависимости наблюдаются только на трех станциях. На ст. 7308 при умеренной концентрации хл "а" на поверхности интегральная величина почти в



Рис. 4. Соотношение между поверхностной концентрацией хл "а" и его интегральными значениями для водной толщи. Отдельно обозначены станции, соотношение для которых отклоняется от общей зависимости (объяснения см. в тексте).

два раза выше, чем на других станциях, что связано с высоким содержанием хл "а" вплоть до глубины 185 м (0.22 мг/м³). На ст. 7316 и 7356 наоборот, при высоких поверхностных значениях концентрация хл "а" резко уменьшалась на глубинах более 30 м.

Интегральное содержание хл "а" в столбе воды различалось на разных станциях более чем в шесть раз, варьируя от 23 до 105 мг/м² (табл. 1), составляя в среднем 55 ± 19 мг/м². Максимальное величина интегрального по глубине содержания хл "а" (150 мг/м²) было определено на ст. 7308 в южной части разреза 1 на шельфе Антарктического полуострова. Минимальные величины (менее 40 мг/м²) наблюдались в центральной глубоководной части пролива (ст. 7301, 7306, 7310 и 7319). Доля хл "а" в эвфотическом слое (относительно всей водной толщи) варьировала от 35 до 100%, составляя в среднем 75 \pm 18%. В наибольшей степени сконцентрированность хл "а" в эвфотическом слое (более 80% от суммарного содержания в столбе воды) была в южной и центральной части разреза 1 (ст. 7294-7301), в северной части разреза 2 (ст. 7314, 7316) и в центре разреза 3 (ст. 7320).

Доля феофитина (неактивной части хл "а") в общей сумме хл "а" и феофитина в проливе Брансфилда на разных глубинах эвфотического слоя изменялась от 15 до 55%. Средняя величина этого показателя в эвфотическом слое варьировала между станциями от 19 до 45%. Значения доли феофитина, не превышающие 25% (что свидетельствует об активном состоянии хл "а"), были приурочены к станциям на шельфе Антарктического полуострова (ст. 7394–7399, 7308) в зоне модифицированной воды моря Уэдделла.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ПЕРВИЧНАЯ И БАКТЕРИАЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ

Станции	ППо	$\Pi\Pi_{\rm HHT}$	АЧ _{макс}	AU _{cp}	ФС				
	Разрез 1								
7294	12.2	435	1.10	0.60	80				
7297	14.7	594	0.89	0.62	72				
7301	13.8	497	2.05	1.20	93				
7305	24.2	487	2.07	0.98	61				
		Раз	рез 2						
7308	20.7	677	1.72	0.87	70				
7314	26.6	741	1.81	0.99	63				
·	Район восточнее пролива								
7356	71.4	1618	2.98	1.47	90				

Таблица 3. Продукционные характеристики фитопланктона в проливе Брансфилда

Примечание. ПП_о – первичная продукция на поверхности, мг С/м³ в сут; ПП_{инт} – интегральная первичная продукция, мг С/м² в сут, $A \Psi_{MAKC}$ – максимальное ассимиляционное число для столба воды, мг С/мг Хл в час; $A \Psi_{cp}$ – среднее для эвфотического слоя ассимиляционное число, мг С/мг Хл в час; ΦC – глубина эвфотического слоя, м.

Первичная продукция. Основная часть ПП (60– 84%) в районе исследований была сосредоточена в верхнем 25-м слое водной толщи. График распределения значений скорости ПП по вертикали на разных станциях, представленный на рис. 36, показывает, что наиболее высокие значения для акватории пролива (более 14 мг C/м³ в сут) были определены в верхнем 10-м слое. В слое 10–35 м значения ПП варьировали от 6.5 до 13.7 мг C/м³ в сут, а в слое глубже 35 м – не превышали 1 мг C/м³ в сут. На ст. 7356 (восточнее пролива) значения ПП в верхнем 30-м слое в несколько раз превышали уровень ПП в проливе (см. рис. 36). Различие на поверхности достигало почти 3-х кратного значения.

Уровень интегральной продуктивности на разрезе 1 был ниже, чем на разрезе 2 (503 ± 66 и 709 ± 45 мг С/м² в сут, соответственно) (табл. 3). На ст. 7356 интегральная ПП была на уровне 1618 мг С/м² в сут.

Максимальные для столба воды значения ассимиляционного числа (АЧ_{макс}), характеризующего удельную фотосинтетическую активность фитопланктона, варьировали на разных станциях от 0.89 до 2.98 мг С/мг Хл в час (в среднем, 1.80 \pm \pm 0.69 мг С/мг Хл в час) и были приурочены к поверхностному горизонту. Наиболее высокие значения (более 2 мг С/мг Хл в час) были установлены в районе восточнее пролива (ст. 7356) и в северной части разреза 1 (ст. 7301 и 7305). Наиболее низкое значение АЧ было на ст. 7297.

Квантовый выход фотосистемы II фитопланктона (F_v/F_m), который характеризует потенциальную фотосинтетическую способность фитопланктона, был на высоком уровне в пределах эвфотического слоя (0.418–0.749). Зона максимальных величин F_v/F_m (0.571–739) располагалась в слое 25–100 м, тогда как в верхнем 25-м слое значения были существенно ниже (0.418–0.587 о.е.) (рис. 5а). Значения rETR в пределах эвфотического слоя изменялись в пределах 1.05–86.5 о.е., закономерно уменьшаясь с глубиной по мере ослабления проникающего света (рис. 5б).

Численность, биомасса и продукция бактериопланктона. Численность бактериопланктона (ЧБ) в пределах 100-м слоя исследованных станций варьировала от 80 до 690 тыс. кл/мл, при среднем значении 300 ± 135 тыс. кл/мл. Максимальные значения ЧБ отмечались в прибрежной зоне на ст. 7314 — среднее 538 \pm 108 тыс. кл/мл, минимальные – на ст. 7301 (среднее 206 ± 60 тыс. кл/мл). Биомасса бактерий (ББ) в пределах 100-м слоя варьировала от 1.10 до 9.10 мг С/м³ (в среднем, 3.61 ± 1.86 мг С/м³). При этом средние значения для конкретных станций на разрезе 1 были близки, а на разрезе 2 – существенно различались (табл. 4). Максимальный уровень биомассы был в северной части пролива в прибрежной зоне Южных Шетландских островов (ст. 7314). Распределение ББ по глубине в пределах 100-м слоя на каждой станции имело свои особенности, но в целом характеризовалось более высокими значениями в верхнем слое (глубиной от 30 до 80 м) и снижением в глубоководной зоне. Исходя из отношения биомассы к численности, можно сказать, что средний размер клеток бактерий варьировал незначительно, с небольшим максимумом на ст. 7314.

Значения ПБ (средние для слоя 0–100 м) значительно различались в пределах района исследований (табл. 4). Наиболее высокие средние значения ПБ был на ст. 7356 и 7314. На станциях разреза 1 общий уровень ПБ был ниже, чем на остальных станциях. Почти на всех станциях в


Рис. 5. Вертикальное распределение значений потенциальной фотосинтетической способности фитопланктона (F_v/F_m) (а) и относительно скорости электронного транспорта (rETR) (б).

верхнем слое (глубиной от 30 до 80 м) значения ПБ были выше, чем в более глубоком слое (рис. 6). По характеру вертикального распределения ПБ ст. 7314 значительно отличалась от остальных станций резким снижением значений в слое 15— 30 м и существенным увеличением на горизонте 64 м.

ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение хлорофилла "а" (интегральные по глубине в слое 0–100 м величины) в проливе Брансфилда варьировало в широких пределах 23–105 мг/м² и было сопоставимо с результатами предыдущих исследований [38, 42]. Многолетние результаты исследований распределения хл "а" в проливе Брансфилда показывают, что в большинстве случаев в летний период наблюдается более высокая его концентрация в северной части пролива (в водной массе TBW) [21, 24, 30, 38]. Однако в период наших исследований подобная зональность в распределении хл "а" была не очевидной. Поверхностные значения хл "а" на разрезе 1 были выше в TBW (в среднем 0.78 ± 0.13 мг/м³) по сравнению с TWW (среднем 0.49 ± 0.16 мг/м³), однако на разрезе 2 картина была иной – высокие значения в южной части разреза и более низкие в северной (0.62 ± 0.17 и 0.94 ± 0.31 мг/м³, соответственно) (табл. 2).

Полученные нами величины ПП_{инт} на станциях в проливе Брансфилда варьировали в пределах 435–741 мгС/м² в сут и также были сопоставимы с результатами предыдущих исследований в этом

				-			
Станции	ЧБ	ББ	ББ/ЧБ	УдББ	ПБ		
Разрез 1							
7294	270	3.32	12.3	0.026	2.18		
7301	230	2.90	12.5	0.015	1.12		
7305	380	3.85	10.1	0.020	1.85		
Paspes 2							
7308	217	2.30	10.5	0.043	2.28		
7314	538	7.30	13.7	0.017	3.18		
Район восточнее пролива							
7356	258	2.98	11.7	0.090	6.50		
	•	•	•				

Таблица 4. Средние значения численности (ЧБ, тыс. кл/мл) и биомассы бактерий (ББ, мг С/м³), отношения биомассы к численности бактерий (ББ/ЧБ, нг/млн кл), удельной скорости роста (УдББ, мг С/м³ в час) и продукции бактерий (ПБ, мг С/м³ в час) в слое 0–100 м на станциях в проливе Брансфилда



Рис. 6. Вертикальное распределение величин ПБ в проливе Брансфилда на разрезе 1 (ст. 7294 – кружки, ст. 7301 – треугольники, ст. 7305 – квадраты) (а), разрезе 2 (ст. 7308 – кружки, ст. 7314 – квадраты) (б) и на ст. 7356 восточнее пролива (в).

районе Антарктики [2, 8, 38, 44]. В пределах каждого из разрезов (пересекавших обе водные массы) вариация значений ПП_{инт} не была связана с водными массами, но между разрезами различия были заметными (503 \pm 66 и 709 \pm 45 мг С/м² в сут, на разрезах 1 и 2 соответственно). Ранее описанные величины ПП в летний период составляли 117-206 мгС/м² в сут в восточной его части [2] и 800 мгС/м² в сут в западной части пролива [44]. Отлельно слелует отметить ст. 7356. гле наблюлалась высокая первичная продуктивность, определяемая высокими значениями ПП (в 2-4 раз выше, чем на станциях в проливе) и концентрации поверхностного хл "а" (в 1.5-3.5 раза выше). Различия в содержании биогенных элементов в четырех субрегионах не определяли вариабельность ПП, т.к. их концентрация была выше лимитирующего фотосинтез уровня.

Величина F_v/F_m , отражающая потенциальную фотосинтетическую способность фитопланктона (можно сказать, "здоровье" фитопланктона), была на высоком уровне на всех станциях в слое 0— 150 м. Небольшое увеличение потенциала наблюдали на станциях 7294 и 7308 (шельфовая зона в районе водной массы TWW). На этих же станциях доля феофитина была минимальной (не более 25%). Показатель доли феофитина от общей суммы хлорофилла и феофитина можно использовать в качестве первичной оценки активности хл "а". Ранее в работе [5] для арктических морей было показано, что доля феофитина менее 40% соответствует активному состоянию хлорофилла с высоким продукционным потенциалом.

Между параметрами продуктивности – rETR и AU – наблюдалась сильная положительная корреляция (r = 0.63, n = 35, P = 0.05). Их можно рассматривать как величины, отражающие интенсивность двух основных этапов фотосинтеза –

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

световых и темновых стадий соответственно. Линейная корреляция между rETR и валовой фиксацией углерода и/или продукцией О2 была установлена в различных регионах Мирового океана [28, 29, 41]. В нашем исслеловании лля проб с разных горизонтов на конкретных станциях связь была еще более сильная (рис. 7). Коэффициент а в уравнениях регрессии может служить показателем эффективности использования энергии, запасенной в реакционных центрах фотосистемы и выражаемой как rETR. в процессе синтеза органического вещества на темновой стадии. Очевидно, что эта эффективность на разных станциях в той или иной степени различается. Наиболее высокие показатели (0.07-0.11) были на ст. 7356 восточнее пролива, где также высокими были значения ПП и содержания хл "а", и на станциях 7301 и 7305 в северной части разреза 1. Станции 7308 и 7314 на разрезе 2 находились в разных водных массах (TWW и TBW, соответственно), однако показатели эффективности здесь были почти одинаковые (0.043 и 0.047). Минимальные значения данного показателя (0.019-0.028) были на станциях 7294 и 7297 в южной части разреза 1 (водная масса TWW). Определенная связь между показателем эффективности использования энергии света в фотосинтезе и водными массами была установлена только в восточной части пролива Брансфилда (разрез 1), тогда как в средней части (разрез 2) такой связи не было.

Аналогично распределению ПП, интегральные значения ПБ на ст. 7356 были выше более чем в два раза по сравнению с другими станциями. Водные массы пролива (TWW и TBW) по этому показателю также существенно не различались.

Полученные нами значения ПБ в целом согласуются со значениями, полученными ранее в этом же или близлежащих районах исследований



Рис. 7. Соотношение между первичной продукцией (АЧ) и относительной скоростью электронного транспорта в фотосистеме 2 (rETR) на конкретных станциях района исследований.

[8, 27, 32, 42]. Следует отметить, что указанные авторы определяли бактериальную продукцию с помощью изотопных методов. Применялись: либо ³Н-тимидин [8, 17] либо ³Н-лейцин [32, 42]. Изотопные методы имеют ряд преимуществ: короткое время экспозиции пробы, отсутствие предварительной фильтрации пробы и связанного с этим возможного повреждения бактериальных клеток с обогащением пробы легкоокисляемым органическим веществом. В тоже время их существенным недостатком является большое количество допущений при пересчетах на продукцию бактериопланктона [17]. Метод "разбавления проб" более трудоемок, возникают опасения "скляночных эффектов" при длительной экспозиции пробы, а также разрушения клеток во время фильтрации пробы. Однако, в работах [15, 17] показано, что результаты определения БП, полученные методом "разбавления проб", вполне сопоставимы с результатами изотопных методов.

Чистая ПП включает образование взвешенного органического вещества и растворенных продуктов фотосинтеза (РОВ), которые выделяются клетками фитопланктона. РОВ является количественно важным и легко усваиваемым источником лабильного и полулабильного органического вещества для гетеротрофного морского бактериопланктона [35]. Кроме того, благодаря ПБ растворенные продукты фотосинтеза, не используемые большинством гидробионтов, возвращаются в пищевую цепь (т.н. микробная петля [3, 11]). Учитывая различное качество фитопланктона и бактерий как пищевых ресурсов, изменение соотношения ПП и ПБ может характеризовать изменение эффективности пищевых трофических цепей и общей продуктивности планктонного сообщества [33, 35]. Кроме того, для верхних освещенных слоев водной толщи увеличение доли ПБ в общей продукции вероятно отражает сукцессионные изменения в микропланктоном сообществе. Пик активности бактерий во многих случаях следует за пиком активности фитопланктона, что может быть связано с ограничениями в скорости потребления РОВ, выделяемых фитопланктоном в большом количестве в активный период [35].

Общая интегральная продукция фито- и бактериопланктона в эвфотическом слое на ст. 7356 была в 3.5 и 2.5 раза выше, чем на станциях разреза 1 и 2, соответственно (рис. 8а). Доля ПП в общей интегральной продукции составляла 74%. На станциях разреза 1 и 2 доля ПП была выше (в среднем, 82 и 80%, соответственно). При этом следует отметить, что на обоих разрезах, пересекавших две водные массы различного генезиса и гидрофизических характеристик (TWW и TBW), различий между северными и южными станциями не обнаружено. Однако были небольшие различия в значениях общей продукции и доли ПП между разрезами (рис. 8).

Рассчитанная для конкретных горизонтов доля ПП в общей продукции района в верхнем 10-м слое



Рис. 8. Интегральные величины первичной и бактериальной продукции (а) и вертикальное распределение доли первичной продукции в общей продукции (б) в проливе Брансфилда.

составляла 82-91% и равномерно снижалась в пределах эвфотического слоя до 15-31% на всех станциях района (рис. 8б). В верхнем 20-м слое, где формировалась основная часть ПП, баланс между автотрофной (фитопланктон) и гетеротрофной (бактерии) продукцией на разных станциях практически не различался при высокой доле ПП. Доминирование автотрофной продукции на всей исследованной акватории определяет равно высокую эффективность пищевой цепи в проливе Брансфилда в этот период, несмотря на присутствие двух разных водных масс. Очевидно также, что микропланктонное сообщество в разных зонах пролива Брансфилда находится на сукцессионной стадии активного накопления органического вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Верхний слой водной толщи в проливе Брансфилда представлен двумя основными водными массами, различающимися по генезису и гидрофизическим характеристикам. Однако в период наших исследований для продукционных параметров в этих водных массах не было установлено значимых различий между северной и южной частями пролива. С другой стороны, в западной части пролива в обеих водных массах интегральная первичная продукция была в полтора раза выше, чем в восточной. Но максимальной интегральная ПП была на ст. 7356 в районе восточнее пролива.

Установлена тесная связь между параметрами первичной продукции — rETR и AЧ — отражающими соответственно интенсивности световой и темновой стадий фотосинтеза на конкретных станциях. Станции, сгруппированные по показателю эффективности использования энергии при

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

синтезе органического вещества (коэффициент *а* в уравнении регрессии или отношение AЧ/rETR), были приурочены к четырем выделенным субрегионам. Наиболее высокий показатель был на ст. 7356 восточнее пролива, где также высокими были значения ПП и содержания хл "а".

Аналогично распределению ПП, интегральные значения ПБ на ст. 7356 были выше более чем в два раза по сравнению с другими станциями. Водные массы пролива (TWW и TBW) по этому показателю существенно не различались. Общая интегральная продукция фито- и бактериопланктона в эвфотическом слое на ст. 7356 была в 3.5 и 2.5 раза выше, чем в восточной и западной частях пролива, соответственно. Доля ПП в общей продукции района в верхнем 10-м слое составляла 82–91%.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания FMWE-2021-0016 (ИО РАН). Обработка CTD данных и анализ термохалинной структуры выполнены при поддержке гранта РНФ 22-77-10004. Гидрооптические измерения и расчет подводной освещенности выполнены в рамках госзадания FNNN-2021-0003 (МГИ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бордовский О.К., Чернякова А.М. Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО РАН, 1992. 200 с.
- 2. Воробьева О.В., Романова Н.Д., Мошаров С.А. и др. Продукционные характеристики фитопланктона пролива Брансфилд в летний период // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 178–186.
- 3. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Микробная петля в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. Ижевск: КнигоГрад., 2011. 332 с.

- 4. *Мошаров С.А., Гонтарев С.В., Корсак М.Н.* Новый фитоинкубатор с регулировкой температуры и освещенности для определения первичной продукции // Безопасность в техносфере. 2015. № 4. С. 3–9.
- 5. Мошаров С.А., Сергеева В.М. Оценка функционального состояния морского фитопланктона по флуоресцентным показателям и соотношению концентраций феофитина и хлорофилла а // Вопросы современной альгологии. 2018. С. 10.
- 6. РД 52.24.380-2006 "Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после восстановления в кадмиевом редукторе".
- РД 52.24.382-2006 "Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом".
- Серегин С.А., Чмыр В.Д., Кузьменко Л.В. Микропланктон западной части пролива Брансфилда: первичная и бактериальная продукция // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 4. С. 73–84
- Alderkamp A.-C., Garcon V., de Baar H.J.W., Arrigo K.R. Short-term photoacclimation effects on photoinhibition of phytoplankton in the Drake Passage (Southern Ocean) // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2011. V 58. P. 943–955. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.07.001
- Alderkamp A.-C., Kulk G., Buma A.G.J. et al. The effect of iron limitation on the photophysiology of *Phaeocystis* antarctica (Prymnesiophyceae) and *Fragilariopsis cylin*drus (Bacillariophyceae) under dynamic irradiance: photophysiology under iron limitation // Journal of Phycology. 2012. V. 48. P. 45–59. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.01098.x
- Azam F., Fenchel T., Field J.G. et al. The ecological role of water-column microbes in the sea // Mar Ecol Prog Ser. 1983. V. 10. P. 257–263. https://doi.org/10.3354/meps010257
- Behrenfeld M.J., Bale A.J., Kolber Z.S. et al. 1996. Confirmation of iron limitation of phytoplankton photosynthesis in the equatorial Pacific Ocean // Nature. 1997. V. 383. P. 508–511. https://doi.org/10.1038/383508a0
- Boyd P.W., Strzepek R., Fu F. et al. Environmental control of open-ocean phytoplankton groups: Now and in the future // Limnol. Oceanogr. 2010. V. 55. P. 1353–1376.
 https://doi.org/10.4310/do.2010.55.3.1353
 - https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1353
- Clowes A.J. Hydrology of the Bransfield Strait // Discovery Reports. 1934. V.9. P. 1–64.
- 15. Ducklow H.W., Hill S.M. The growth of heterotrophic bacteria in the surface waters of warm core rings // Limnol. Oceanogr. 1985. V. 30. № 2. P. 239–259. https://doi.org/10.4319/10.1985.30.2.0239
- Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water exchange between deep basins of the Bransfield Strait // Water MDPI. 2022. Vol. 14. P. 3193. https://doi.org/10.3390/w14203193
- 17. Fuhrman J.A., Azam F. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica, and California // Appl. Environ.

Microbiol. 1980. V. 39. № 6. P.1086–1095. https://doi.org/10.1128/AEM.39.6.1085-1095.1980

 Galbraith E.D., Gnanadesikan A., Dunne J.P. et al. Regional impacts of iron-light colimitation in a global biogeochemical model // Biogeosciences. 2010. V. 7. P. 1043–1064.

https://doi.org/0.5194/bg-7-1043-2010

- García M.A., López O., Sospedra J. et al. Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer // Annales Geophysicae. 1994. V. 12. No. 9. P. 856–867. https://doi.org/10.1007/s00585-994-0856-z
- 20. *Genty B., Briantais J.-M., Baker N.R.* The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence // Biochim. Biophys. Acta. 1989. V. 990. P. 87–92.
- Gonçalves-Araujo, R., de Souza, M.S., Tavano, V.M. et al. Influence of oceanographic features on spatial and interannual variability of phytoplankton in the Bransfield Strait, Antarctica // J. Mar. Syst. 2015. V. 142. P. 1–15.
- 22. *Hobbie L.E., Daley R.I.* Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // Appl. and Environ. Microbiol. 1977. V. 33(5). P. 1225–1228. https://doi.org/10.1128/AEM.33.5.1225-1228.1977
- Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.
- Holm-Hansen O., Naganobu N., Kawaguchi S. et al. Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters // Deep-Sea Res. II. 2004. V. 51. P. 1333–1350.
- JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study Protocols), 1994. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS) Core Measurements. UNESCO, Paris, pp. 119–122.
- 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. ES2006. https://doi.org/10.2205/2020ES000711
- Kogure K., Fukami K., Simidu U., Taga N. Abundance and production of bacterioplankton in the Antarctic // Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue. 1986. V. 40. P. 414–422.
- 28. *Kromkamp J.C., Dijkman N.A., Peene J. et al.* Estimating phytoplankton primary production in Lake IJsselmeer (The Netherlands) using variable fluorescence (PAM-FRRF) and C uptake techniques // Eur. J. Phycol. 2008. V. 43. P. 327–344.
- Lawrenz E., Silsbe G., Capuzzo E. et al. Predicting the electron requirement for carbon fixation in seas and oceans // PLoS One. 2013. V. 8(3). e58137. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058137
- Mendes C.R.B., de Souza M.S., Tavano V.M. et al. Dynamics of phytoplankton communities during late summer around the tip of the Antarctic Peninsula // Deep-Sea Res. I. 2012. V. 65. P. 1–14.
- 31. *Meon B., Amon R.M.W.* Heterotrophic bacterial activity and fluxes of dissolved free amino and glucose in the Arctic rivers Ob, Yenisei and the adjacent Kara Sea // Aquatic Microbial Ecology. 2004. V. 37. P. 121–135. https://doi.org/10.3354/ame037121

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

616

- 32. Morán X.A.G, Gasol J.M., Pedrós-Alió C. et al. Dissolved and particulate primary production and bacterial production in offshore Antarctic waters during austral summer: coupled or uncoupled? // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2001. V. 222. P. 25-39.
- 33. Morozov E.G., Flint M.V., Orlov A.M. et al. Oceanographic and Ecosystem Studies in the Atlantic Sector of Antarctica (Cruise 87 of the Research Vessel Akademik Mstislav Keldysh) // Oceanology. 2022. V. 62. No. 5. P. 721-723.
- 34. Norland S. The relationship between biomass and volume of bacteria. In: Kemp P. F., Cole J.J., Sherr B.F., Sherr E.B. (Eds.), Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology. Lewis Publ, Boca Raton, 1993. P. 303-308. https://doi.org/10.1201/9780203752746-36
- 35. Piontek J., Endres S., Le Moigne F.A.C. et al. Relevance of nutrient-limited phytoplankton production and its bacterial remineralization for carbon and oxygen fluxes in the Baltic Sea // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. Article 581.
- 36. Porter K.G., Feig Y.S. The use DAPI for identifying and counting of aquatic microflora // Limnol. Oceanogr. 1980. V. 25. № 5. P. 943–948.
- 37. Posch T., Loferer-Krößbacher M., Gao G. et al. Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes, and of allometric and linear volume-to carbon conversion factors // Aquat. Microb. Ecol. 2001. V. 25. P. 55-63. https://doi.org/10.3354/AME025055
- 38. Russo A.D.P.G., de Souza M.S., Mendes C.R.B. et al. Spatial variability of photophysiology and primary production rates of the phytoplankton communities across the western Antarctic Peninsula in late summer 2013 // Deep-Sea Res. Part II. 2018. V. 149. P. 99-110. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.021

- 39. Sangrà P., Gordo C., Hernández-Arencibia M. et al. The Bransfield Current system. Deep-Sea Res. I. 2011. V. 58. No. 4. P. 390-402. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011
- 40. Steemann-Nielsen E. The use of radio-active carbon (C14) for measuring organic production in the sea //Journal du Conseil/Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer. 1952. V. 18. P. 117-140.
- 41. Suggett D.J., MacIntyre H.L., Kana T.M. et al. Comparing electron transport with gas exchange: parameterising exchange rates between alternative photosynthetic currencies for eukaryotic phytoplankton // Aquat. Microb. Ecol. 2009. V. 56. P. 147–162. https://doi.org/10.3354/ame01303
- 42. Teira E., Mourino-Carballido B., Martinez-Garcia S. et al. Primary production and bacterial carbon metabolism around South Shetland Island in the Southern Ocean // Deep-Sea Res I. 2012. V. 69. P. 70-81. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.07.002
- 43. 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. V. 8. P. 333-336
- 44. Valera M., Fernandes E., Serret P. Size-fractionated phytoplankton biomass and primary production in the Gerlache and south Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) in Austral summer 1995–1996 // Deep-Sea Res. II. 2002. V. 49. P. 749-768.
- 45. Zhou M., Niiler P.P., Hu J.-H. Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica // Deep Sea Res. I. 2002. V. 49. No. 2. P. 267-280. https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00062-0
- 46. Zhou X., Zhu G., Hu S. Influence of tides on mass transport in the Bransfield Strait and the adjacent areas, Antarctic // Polar Science. 2020. V. 23. 100506. https://doi.org/10.1016/i.polar.2020.100506

Primary and Bacterial Production in the Bransfield Strait (Antarctica) in Summer

S. A. Mosharov^{a, b, #}, I. V. Mosharova^{a, c}, D. I. Frev^a, A. M. Seliverstova^a, A. A. Latushkin^d, S. V. Gontarev^a

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia ^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia ^cLomonosov Moscow State University, Department of Biology, Moscow, Russia ^dMarine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

[#]e-mail: sampost@list.ru

The spatial distribution of the main primary productivity parameters in the Bransfield Strait in the Antarctic summer presents. The integrated primary production in the strait varied from 435 to 741 mgC/m² per day. The share of primary production in the total production of phyto- and bacterioplankton in the upper 10th layer was 82–91%. Potential photosynthetic capacity (F_v/F_m) was high within the euphotic layer (0.418–0.749) throughout the area. The production parameters in the two main water masses in the strait did not differ. Photosynthetic efficiency (the ratio of the assimilation number and the relative electron transport rate, AN/rETR) varied in different subregions of the study area by almost six times.

Keywords: Primary production, heterotrophic bacterial production, active chlorophyll a fluorescence, Bransfield Strait, Antarctica

УДК 581.132.1:535.35(269.4)

КОНЦЕНТРАЦИЯ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА *а* В АТЛАНТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ АНТАРКТИКИ

© 2023 г. Н. А. Моисеева^{1, *}, Т. Я. Чурилова¹, Т. В. Ефимова¹, Е. Ю. Скороход¹, В. А. Артемьев², А. В. Юшманова²

¹Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: moiseeva@ibss-ras.ru Поступила в редакцию 01.12.2022 г. Постя порботки 30 01 2023 г.

После доработки 30.01.2023 г. Принята к публикации 16.02.2023 г.

Исследования проведены в 79 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш". Проведена оценка удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона и коэффициента связи интенсивности флуоресценции с концентрацией хлорофилла *a* на различных оптических глубинах в естественных условиях освещения и после темновой адаптации. Показано, что при отсутствии ярко выраженной стратификации вод не наблюдается вертикальной изменчивости удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона. Установлено, что при измерении интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* погружным датчиком, без предварительной темновой адаптации, наблюдается снижение сигнала интенсивности флуоресценции в верхнем слое вод, связанное с влиянием освещенности на квантовый выход флуоресценции.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, флуоресценция, погружной датчик, поглощение света пигментами фитопланктона, Антарктика

DOI: 10.31857/S0030157423040111, EDN: YMIBBU

введение

В настоящее время использование флуоресценции широко применяется для оценки продукционных характеристик акваторий. В природных водах профиль флуоресценции измеряется с помощью погружных датчиков, которые устанавливаются на гидрологическом комплексе (СТD), измеряющем глубину, температуру и соленость. Помимо гидрологических комплексов, для длительных наблюдений с высокой периодичностью используются дрейфующие буи, которые позволяют измерять вертикальные профили как гидрофизических/гидрохимических параметров, так и биологических, в частности – флуоресценции хлорофилла *а*.

Известно [3], что в естественных условиях интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (*F*, мкЭ м⁻³ c⁻¹) зависит от световых условий среды: фотосинтетически активная радиация (*PAR*, мкЭ м⁻² c⁻¹), концентрации хлорофилла *a* (*Chl-a*, мг м⁻³) и функциональных характеристик фитопланктона ($a_{ph}^{*}(\lambda), \varphi_{F}$).

$$F = PARChl - a\overline{a_{ph}^{*}}(\lambda)Q_{a}^{*}\varphi_{F}, \qquad (1)$$

где $a_{ph}^*(\lambda)$ — среднее по спектру значение показателя удельного (нормированного на *Chl-a*) поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}^*(\lambda)$, $M^2 M\Gamma^{-1}$); φ_F — квантовый выход флуоресценции ((моль испускаемых фотонов)/(моль поглощенных фотонов)); Q_a^* — коэффициент внутриклеточной реабсорбции флуоресценции, безразмерный.

Применительно для погружных зондов эта формула будет иметь следующий вид:

$$F = E_{\lambda_{ex}} Chl - aa_{ph}^* (\lambda_{ex}) Q_a^* \varphi_F, \qquad (2)$$

где $E_{\lambda_{ex}}$ — интенсивность возбуждающего флуоресценцию излучения на длине волны λ_{ex} ; $a_{ph}^*(\lambda_{ex})$ — удельный (нормированный на *Chl-a*) показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны λ_{ex} .

Интенсивность света

Свет — один из факторов среды, который влияет на функциональные характеристики фитопланктона, в том числе на его способность погло-

щать кванты света $(a_{nh}^*(\lambda))$ [14, 25] и на квантовый

выход флуоресценции [3]. Фотосинтетический аппарат микроводорослей представляет совокупность элементов — фотосинтетических единиц, состоящих из двух фотосистем (ФС 1 и ФС 2) [32, 33]. Каждая фотосистема состоит из реакционного центра (РЦ 1 или РЦ 2, соответственно) и свет собирающего комплекса пигментов. Флуоресценция хлорофилла *a* (*Chl-a*) в основном связана с ФС 2 [3].

Квантовый выход флуоресценции

Квантовый выход флуоресценции – это отношение испущенных фотонов к поглощенным. Количество поглощенного фитопланктоном света будет определяться произведением: $E_{\lambda_{m}}Chl$ – $-aa_{ph}^{*}(\lambda_{ex})$, а величина испущенных фотонов будет пропорциональна величине F. Максимальная квантовая эффективность транспорта электронов через ФС 2 оценивается при условии, что все реакционные центры находятся в "открытом" состоянии [32]. В природных условиях фитопланктон приспосабливается к световым условиям существования. Под действием света часть РЦ находится в закрытом состоянии [13]. Таким образом, значение F, регистрируемой погружным зондом, под действием солнечного света, уменьшается за счет тушения флуоресценции. В соответствии с [21, 27] тушение квантового выхода флуоресценции, может быть разделено на два различных режима:

1. Фотохимическое тушение (qP) — тушение флуоресценции при непрерывном освещении в результате конкуренции первичной фотохимии в ФС 2 с эмиссией флуоресценции [21] отражает окислительно-восстановительное состояние Q_A (первичный хиноновый акцептор электронов ФС 2). Тушение qP связано с квантовым выходом фотосинтеза и, поэтому является теоретической основой для расчета первичной продукции по флуоресцентным данным. Время, необходимое для восстановления Q_A , составляет 1—2 секунды [19].

2. Нефотохимическое тушение (*qN*) – процесс преобразования части энергии, поглощаемой в световой фазе фотосинтеза, в тепло [24]. Включает:

— Энергозависимое тушение (qE), связанное с тушением в антеннах ФС 2 за счет закисления просвета тилакоидов в результате транспорта электронов [20], этот вид тушения является основным в "нестрессовых" условиях [4]. Время релаксации — от нескольких секунд до минуты [28];

— Тушение, связанное с переходом между состояниями мембран хлоропластов в результате миграции хлорофилл-белковых комплексов между Φ С 1 и Φ С 2 [23] (*qT*). Имеет значимые величины при низких уровнях освещенности [4]. Время релаксации — в пределах десятков минут [28];

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

— Фотоингибирование (qI) — значимо при уровнях освещенности, превышающих уровень, необходимый для насыщения фотосинтеза, или когда стрессовые условия сильно ограничивают потребление восстановителей, образующихся при синтетическом переносе электрона [4]. Время релаксации — в пределах нескольких часов [28].

Поглощение света пигментами фитопланктона

Изменчивость удельного (нормированного на *Chl-a*) показателя поглощения света пигментами фитопланктона $\begin{pmatrix} a_{ph}^*(\lambda) \end{pmatrix}$ обусловлена степенью упаковки пигментов (так называемый "package effect"), связанной с адаптивными физиологическими изменениями внутриклеточной концентрации пигментов к условиям среды [9] и размерной структуры фитопланктона [25]. В результате изменения степени упаковки пигментов величи-

на $a_{ph}^{*}(\lambda)$ может изменяться более, чем на порядок [2, 7].

Коэффициент реабсорбции

Известно [3], что красная полоса поглощения *Chl-а* в коротковолновой части спектра (~678 нм) частично перекрывает свою полосу флуоресценции (~685 нм), что может приводить к частичной реабсорбции флуоресцентного излучения. Доля флуоресценции, которая не реабсорбируется на 685 нм, определяется безразмерным фактором Q:(685) [10], величина которого изменяется от 0.66 до 1 в зависимости от видов фитопланктона [10].

Настоящие исследования были нацелены на анализ изменчивости концентрация хлорофилла aи физиологических характеристик фитопланктона (спектральный показатель поглощения света пигментами фитопланктона) в зависимости от факторов окружающей среды (*PAR*) и на оценку связи между *F* и поглощением света пигментами фитопланктона на длине волны возбуждения флуоресценции (a_{ph} (450)).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 79 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в водах Атлантического сектора Антарктики (рис. 1) в течение южного лета 2020 г. (11 января—4 февраля). На всех станциях измеряли профили температуры и солености с помощью комплекса СТD (Sea-Bird SBE-911), а профиль интенсивности флуоресценции — с помощью зондирующего прозрачномера ПУМ-200.

Фотосинтетически активная радиация (*PAR*), падающая на поверхность моря и проникающая



Рис. 1. Карта станций 79 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января—4 февраля 2020 г.

в море, измерялась на палубе и с помощью погружного прибора Li-COR. На основании данных, полученных с СТD, ПУМ-200 и Li-COR, пробы воды отбирали с разных горизонтов с помощью кассеты батометров, прикрепленных к СТD.

Определение оптических глубин и верхнего квазиооднородного слоя (BKC)

Первую оптическую глубину и глубину зоны фотосинтеза (Z_{eu}) определяли по данным Li-COR как глубину, на которой PAR уменьшается в 2.71 и 100 раз, соответственно, по отношению к PAR, падающей на поверхность моря [17].

ВКС определяли по критериям изменения значений абсолютной разности потенциальной температуры (0.2°С) и плотности (0.03 кг/м³) в соответствии с [12].

Измерение концентрации хлорофилла а и феопигментов

Величину *Chl-а* определяли спектрофотометрически методом в ацетоновом (90%) экстракте пигментов [16] на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer). Пробы воды фильтровали сразу после отбора при низким вакууме (<0.2 атм.), используя стекловолоконные фильтры Whatman GF/F. Фильтры с пробами хранили в жидком азоте до проведения измерений в лаборатории. Долю феопигментов не учитывали, поскольку известно [15], что феопигменты, дают одинаковый вклад в F_0 и F_m , а следовательно, не влияет на максимальную величину переменной флуоресценции (F_v).

Измерение показателя поглощения света пигментами фитопланктона (a_{nh}(λ))

Поглощение света взвешенным веществом $(a_p(\lambda))$ измеряли в соответствии с текущим протоколом NASA [29]. Для разделения $a_p(\lambda)$ на $a_{ph}(\lambda)$ и несвязанную с фитопланктоном взвесь $(a_{NAP}(\lambda))$ проводили экстракцию пигментов горячим метанолом в соответствии с методикой [18]. Оптическую плотность проб измеряли в диапазоне от 350 до 750 нм с шагом в 1 нм на двухлучевом спектрофотометре Lambda 35 (Perkin Elmer), снабженном интегрирующей сферой. Методика более детально описана в работе [8].

Измерение интенсивности флуоресценции хлорофилла-а

Измерение интенсивности флуоресценции хлорофилла *а* проводили на лабораторном флуори-

Дата	PAR, $\Im \text{ m}^{-2} \text{ cyr}^{-1}$	Станция	Время работ*	Дата	$\begin{array}{c} \text{PAR,} \\ \Im \text{M}^{-2} \text{cyt}^{-1} \end{array}$	Станция	Время работ
21.01.2020	31.1	6587	3:00	26.01.2020	18.3	6604	20:29
		6590	7:27				
		6591	9:12	27.01.2020	27.9	6607	19:55
		6592	11:52	28.01.2020	24.3	6608	8:10
		6593	14:46			6609	16:40
		6594	17:37	29.01.2020	26.1	6613	7:58
		6595	19:58			6614	20:25
22.01.2020	31.2	6596	17:49	01.02.2020	25.9	6619	13:34
23.01.2020	27.2	6597	14:38	03.02.2020	27.1	6622	2:32
24.01.2020	20.8	6599	15:44			6625	7:55
25.01.2020	22.4	6600	1:04			6627	10:52
		6601	9:09	04.02.2020	13.8	6631	5:12
		6602	17:48				
		6603	22:45				

Таблица 1. Суточная интенсивность света в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января—4 февраля 2020 г.

* время работ по местному времени.

метре SMART [1], на котором флуоресценция возбуждается излучением на длине волны 450 нм. После помещения образца в измерительную камеру проводили адаптацию фитопланктона к темноте в течение 30 минут [3] и регистрировали параметр F_0 — флуоресценция в адаптированном к темноте состоянии, когда все неповрежденные реакционные центры открыты [15].

Интенсивность флуоресценции растворенного органического вещества (РОВ) принималась за фон (F_{CDOM}) и вычиталась из флуоресценции пробы. Для получения РОВ пробы морской воды фильтровали при вакууме (<0.2 атм.) через нуклеопоровый фильтр (Sartorius Nuclepore, 0.2 мкм), предварительно промытый деионизированной водой [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В связи с тем, что функциональные характеристики фитопланктона (спектральный удельный показатель поглощения света, квантовый выход флуоресценции) зависят от освещенности (уравнение 2), анализ проводили по выделенным слоям:

1. от поверхности до 1 оптической глубины

2. от 1 до 4.6 оптических глубин (до нижней границы зоны фотосинтеза)

3. для всей зоны фотосинтеза.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

Условия существования фитопланктона

Световые условия

В период работ суточная интенсивность падающего на поверхность света изменялась от 13.8 до 31.2 Э м⁻² сут⁻¹ (табл. 1) и средняя величина составляла 25 ± 5 Э м⁻² сут⁻¹. Глубина зоны фотосинтеза изменялась между станциями от 50 м (ст. 6614) до 83 м (ст. 6619) за исключением двух станций (ст. 6609 и 6613), где отмечена более низкая прозрачность вод ($Z_{eu} = 28$ и 35 м). В среднем Z_{eu} составляла 64 ± 12 м.

Гидрологические условия

В исследуемый период температура воды в поверхностном слое моря изменялась в проливе Брансфилда от -0.47 до 3.19° С, в среднем составляла $1.29 \pm 1.4^{\circ}$ С, в бассейне Пауэлла – от -0.77 до 2.01° С, в среднем $-0.72 \pm 0.89^{\circ}$ С, более подробно гидрологические условия описаны в [26]. На большинстве станций была практически одинаковая температура во всем исследованном слое, на отдельных станциях наблюдали сформированный ВКС толщиной от 7 до 47 м [26].

Фоновая флуоресценция

Величина F_{CDOM} изменялась от 4.8 до 11.1 отн. ед., в среднем составляя 5.96 \pm 0.76 отн. ед. Вклад F_{CDOM} в общую флуоресценцию ($F_{CDOM} + F_0$) изме-



Рис. 2. (а) — Изменение относительного вклада флуоресценции растворенного органического вещества (F_{CDOM}) в общую флуоресценцию ($F_{CDOM} + F_0$) по глубине во всей исследуемой акватории; (б) — изменение абсолютных величин $F_{CDOM} + F_0$ в зависимости от величины F_{CDOM} в различных оптических слоях (\square – глубины ≤ 1 оптической глубины; \square – глубины ≥ 1 оптической глубины) исследуемой акватории в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января–4 февраля 2020 г.

нялся от 2 до 47%, в среднем составляя $14 \pm 10\%$ (рис. 2).

Концентрация хлорофилла а

В исследуемом районе наблюдалась высокая (~10 раз) вариабельность *Chl-a*, как по поверхности исследованной акватории, так и в пределах зоны фотосинтеза. Величина Chl-а в слое первой оптической глубины изменялась от 0.22 до 4.4 мг м⁻³. Максимальные значения *Chl-а* отмечены на станциях 6609 (*Chl-a* = 4.4 мг м^{-3}) и 6613 $(Chl-a = 2.2 \text{ мг м}^{-3})$ в бассейне Пауэлла. При этом средняя величина этого параметра в поверхностном слое для всех станций, за исключением 6609 и 6613, составляла 0.69 ± 0.38 мг м⁻³. В слое 1-4.6 оптических глубин средняя величина Chl-а составляла 0.55 ± 0.33 мг м⁻³. Для всей зоны фотосинтеза (за исключением ст. 6609 и 6613) отмечен лиапазон вариабельности *Chl-a* 0.1–1.8 мг м⁻³. В среднем для зоны фотосинтеза величина Chl-а равнялась 0.61 \pm 0.35 мг м⁻³. На большинстве станций наблюдалось уменьшение Chl-a с глубиной [8].

Связь интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* с концентрацией хлорофилла *a*

При пересчете данных интенсивности флуоресценции, полученных с погружных датчиков, в концентрацию хлорофилла *a*, используют прямо пропорциональную зависимость [30].

На рис. 3 показана связь *F*, измеренной погружным флуориметром (3а) и лабораторным флуориметром после темновой адаптации фитопланктона (36) (см. Методы), с *Chl-a*.

Корреляционные кривые построены без учета 2 точек (станция 6609 на глубине 0 и 15 м). Эти точки сильно выпадают из обшей зависимости (рис. 3a) из-за высокой PAR в момент измерения (1200 мкЭ м⁻² с⁻¹, время измерения 16:40). После темновой адаптации фитопланктона (рис. 36) эти точки так же не вписываются в общую зависимость. Это, вероятнее всего, обусловлено ингибирующим воздействием света на РЦ ФС2, для восстановления которых использованной длительности темновой адаптации было недостаточно. Очевидно (рис. 3), что ингибирующий эффект в диапазоне больших значений *Chl-а* выражен более значительно, чем в диапазоне малых значений Chl-a. В области малых концентраций отмечается тенденция к завышению флуоресценции, что, возможно, происходит за счет фонового сигнала флуоресценции РОВ, который смещает все точки вверх вначале координат. Коэффициент детерминации (r^2) в обоих случаях достаточно велик. Однако, в зависимости F-CTD - Chl-а наблюдается большое различие (~20%) между значениями коэффициентов, полученных в зависимостях для выделенных слоев. Отмеченное раз-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 3. Связь интенсивности флуоресценции хлорофилла а измеренной погружным датчиком (а) и на лабораторном флуориметре (б) с концентрацией хлорофилла *a*, измеренной спектрофотометрическим методом, в различных оптических слоях исследуемой акватории в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января—4 февраля 2020 г., обозначения см. на рис. 2.

личие в коэффициенте связи *F-CTD* – *Chl-а* между слоями может быть связано как с изменением удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона с глубиной в результате адаптации фитопланктона к условиям среды, так и с влиянием света на квантовый выход флуоресценции (уравнение 2).

В случае построения зависимости $F_0 - Chl$ -а различий в коэффициентах связи между выделенными слоями практически не наблюдается (~7%).

Связь интенсивности флуоресценции хлорофилла *а* и показателя поглощения света пигментами фитопланктона

Известно [6], что связь *Chl-a*– $a_{ph}(\lambda)$ описывается степенной зависимостью. Для выделенных трех слоев установлена связь между *Chl-a* и $a_{ph}(\lambda)$ на длине волны 450 нм, которая соответствует длине волны возбуждения флуоресценции (см. Методы) (рис. 4а). Связи F_0 –*Chl-a* и F_0 – a_{ph} (450) описываются линейной зависимостью в соответствии с [3] (рис. 46, 4в). Коэффициенты полученных связей, для всех исследуемых слоев, представлены в таблице 2.

Величина коэффициента A в связи a_{ph} (450)— *Chl-а* уменьшалась с глубиной на ~13%, величина степенного коэффициента b близка к 1 во всех выделенных слоях. Учитывая это, можно говорить о том, что с увеличением концентрации *Chl-а* удельный (нормированный на *Chl-а*) показатель поглощения света пигментами фитопланктона $(a_{ph}^{*}(450))$ будет неизменным. Таким образом, коэффициент *A* в связи a_{ph} (450)–*Chl-a* соответствует $a_{ph}^{*}(450)$.

Величина коэффициента *A* в связи F_0 —*Chl-а* уменьшается на ~4%. Фактически коэффициент *A* в связи F_0 —*Chl-а* отражает флуоресцентную активность единицы концентрации хлорофилла *a* (F_0^*), которая в нашем случае оставалась практически неизменной.

Измерение величины F_0 проводили на лабораторном флуориметре с постоянной возбуждающей интенсивностью света, поэтому величину РАR в уравнении 1 мы принимаем постоянной. Коэффициент реабсорбции Q_a^* зависит от поглощения света хлорофиллом *a* в красной области (685 нм), в проведенных исследованиях определяли a_{ph}^* (685). В слое до 1-й оптической глубины a_{ph}^* (685) изменялось от 0.0108 до 0.0121 м² мг⁻¹, в среднем составляя 0.0116 ± 0.0003 м² мг⁻¹, в слое больше 1 оптической глубины изменялось от 0.0109 до 0.0123 м² мг⁻¹, в среднем 0.0117 ± 0.0003 м² мг⁻¹. Ущити вод. что a^* (685) праутически не изменялось и постоя составляя 0.0117 ± 0.0003 м² мг⁻¹.

Учитывая, что $a_{ph}^{*}(685)$ практически не изменялось по глубине, можно говорить о том, что вклад

 Q_a^* в величину *F* (уравнение 1) будет постоянным. В этом случае уравнение 1 примет вид:

$$F = Chl - aa_{ph}(450)^* \varphi_F \tag{3}$$

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 4. (а) – Связь показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 450 нм (a_{ph} (450)) с концентрацией хлорофилла а (*Chl-a*) в выбранных слоях; (б) – связь интенсивности флуоресценции, регистрируемой лабораторным флуориметром после темновой адаптации (F_0) с *Chl-a* в выбранных слоях; (в) – связь F_0 с a_{ph} (450) в выбранных слоях исследуемой акватории в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января—4 февраля 2020 г., обозначения см. на рис. 2.

или

$$F_0^* = a_{ph}^* (450) \varphi_F.$$
 (4)

Величина φ_F уменьшилась на ~15% в слое до 1-й оптической глубины относительно слоя глубже 1-й оптической глубины. В результате получили, что удельное поглощение и квантовый выход изменяются в противоположном направлении, поддерживая постоянный уровень удельной флуоресценции (уравнение 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

При высокой вариабельности Chl-a, практиче-

ски не наблюдалось изменения величины $a_{ph}^*(450)$ по выделенным слоям. Из литературных данных [7, 22, 25] известно, что изменение величины

 $a_{ph}^{*}(\lambda)$ происходит в результате акклимации фитопланктонного сообщества к факторам среды (освещенность, температура, обеспеченность биогенными элементами). В исследуемый период на большинстве станций наблюдалось незначительное изменение температуры по выделенным слоям. В освещенном слое не отмечено лимитирования по биогенным элементам [31]. Таким образом, освещенность – фактор среды, который является наиболее вариабельным в пределах зоны фотосинтеза (два порядка). Известно, что изменение величин показателей $a_{ph}^{*}(\lambda)$ с глубиной [6] происходит в результате адаптации фитопланктона к свету при условии плотностной стратификации

свету при условии плотностной стратификации вод и слабого вертикального перемешивания водных масс [11]. Однако гидрологические условия в районе исследований не позволяют сделать вы-

a_{ph} (450)– <i>Chl-a</i>				F ₀ -Chl-a			$F_0 - a_{ph}$ (450)		
<i>A</i> *	<i>b</i> *	r^2	п	A*	r^2	п	A*	r^2	п
Слой от 0 м до 1 оптической глубины включительно									
0.039	0.99	0.82	44	93	0.90	39	1970	0.83	48
	Слой от >1 до 4.6 оптических глубин								
0.034	1.07	0.72	82	91	0.79	92	2311	0.77	86
Слой от 0 м до до 4.6 оптических глубин									
0.036	1.08	0.76	126	92	0.84	133	2102	0.81	134

Таблица 2. Коэффициенты связи: показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 450 нм (a_{ph} (450)) с концентрацией хлорофилла а (*Chl-a*); интенсивности флуоресценции, измеренной на лабораторном флуориметре (F_0) с *Chl-a*; F_0 с a_{nh} (450) для разных слоев

* А - коэффициент пропорциональности

b – степенной коэффициент в уравнении вида: $a_{ph}(450) = A(Chl - a)^{b}$.



Рис. 5. Профили вертикального распределения: температуры (T) – серая линия; интенсивности PAR, измеренной Li-COR – пунктирная линия; интенсивности флуоресценции (F) измеренной погружным датчиком ПУМ-200 – черная линия, и концентрации хлорофилла а (Chl-a) – \bullet на отдельных станциях в слоях в водах Атлантического сектора Антарктики, 11 января–4 февраля 2020 г., обозначения см. рис. 2.

вод об устойчивости водного столба, что и явля-

лось причиной слабой изменчивости $a_{\scriptscriptstyle ph}^*(\lambda)$ между выделенными слоями. На основании выше сказанного можно заключить, что во время нашего исследования не наблюдалось существенных различий между выделенными слоями по структуре и функциональным характеристикам фитопланктона. Коэффициент связи F_0 и a_{ph} (450), характеризующий ϕ_F , изменялся незначительно (см. таблицу 2). Это свидетельствует об отсутствии фотоингибирующего влияния света на фотосинтетический аппарат микроводорослей. Следовательно, различия в коэффициентах связи *F*-*Chl-a*, установленные для выделенных слоев, обусловлены не физиологическим различием в фитопланктонном сообществе, а влиянием освещенности на квантовый выход флуоресценции, измеряемой погружным датчиком. Влияние освещенности на F в естественных условиях представлено на рисунке 5. Очевидно, что при невысоких значениях РАК (рис. 5, ст. 6601) влияние естественной освещенности на ϕ_F незначительно. Однако при высоких значениях PAR и Chl-a (рис. 5, ст. 6609) наблюдается значительное уменьшение F, регистрируемой погружным зондом в ВКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показали, что при слабо выраженной плотностной стратификации вод отсут-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ствует значимое изменение величин и формы

спектров $a_{ph}^{*}(\lambda)$ с глубиной в пределах зоны фотосинтеза. Это объясняет практически одинаковый коэффициент связи *F*—*Chl-а* на разных оптических глубинах. При измерении интенсивности флуоресценции погружным датчиком (без камеры для темновой адаптации фитопланктона) коэффициент связи *F*—*Chl-а* более изменчив между оптическими глубинами, что объясняется влиянием интенсивности проникающего света на квантовый выход флуоресценции.

Благодарность: Авторы выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за внимательное прочтение статьи, их комментарии и полезные предложения. Так же авторы благодарны капитану и экипажу НИС "Академик Мстислав Келдыш" за техническую помощь.

Источник финансирования. Анализ связи показателей поглощения света пигментами фитопланктона с концентрацией хлорофилла *а* и выполнен при поддержке гранта РНФ № 22-27-00790. Отбор и первичная обработка проб в ходе 79 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" проводились в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (121090800137-6). Обработка данных, расчеты и разработка алгоритма коррекции флуоресценции хлорофилла *а* проводились в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (121040100327-3). Измерения значений гидрооптических характеристик приборами ПУМ-200 и Li-COR выполнены в рамках государственного задания по теме № FM-WE-2021-0001, обработка данных — при поддерж-ке гранта РНФ № 21-77-10059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Antal T., Konyukhov I., Volgusheva A. et al. Chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors // Physiologia plantarum. 2019. V. 165. № 3. P. 476–486.
- 2. Babin M., Morel A., Gentili B. Remote sensing of sea surface sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll *a* fluorescence // International Journal of Remote Sensing. 1996. V. 17. № 12. P. 2417–2448.
- 3. *Babin M.* Phytoplankton fluorescence: theory. current literature and in situ measurement // Real-time Coastal Observing Systems for Marine Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Blooms: Theory. Instrumentation and Modelling. Paris: UNESCO Publishing, 2008. P. 237–280.
- Baker N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo* // Annual review of plant biology. 2008. V. 59. P. 89.
- 5. Boss E., Haëntjens N., Ackleson S.G. et al. IOCCG Ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation inherent optical property measurements and protocols: best practices for the collection and processing of ship-based underway flow-through optical data (v4. 0). 2019.
- Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1995. V. 100. Iss. C7. P. 13321–13332.
- Churilova T., Suslin V., Krivenko O. et al. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: seasonality and parameterization // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. P. 90.
- 8. *Churilova T., Moiseeva N., Efimova T. et al.* Spectral bio-optical properties of waters in the Bransfield Strait and Powell Basin // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer: Cham, 2021. P. 217–228.
- 9. *Ciotti A.M., Lewis M.R., Cullen J.J.* Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient // Limnology and Oceanography. 2002. V. 47. № 2. P. 404–417.
- Collins D.J., Kiefer D.A., Soohoo J.B., McDermid I.S. The role of reabsorption in the spectral distribution of phytoplankton fluorescence emission // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1985. V. 32. № 8. P. 983–1003.
- 11. *Cullen J.J., Lewis M.R.* The kinetics of algal photoadaptation in the context of vertical mixing // Journal of Plankton Research. 1988. V. 10. № 5. P. 1039–1063.
- 12. *de Boyer M.C., Madec G., Fischer A. S. et al.* Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile

data and a profile-based climatology // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. V. 109. C12003. 20 p.

- 13. *Falkowski P., Kiefer. D.A.* Chlorophyll *a* fluorescence in phytoplankton: relationship to photosynthesis and biomass // Journal of Plankton Research. 1985. V. 7. № 5. P. 715–731.
- 14. *Falkowski P.G., Raven J.A.* Aquatic photosynthesis, 2nd. ed. Princeton: Princeton University Press, 2007. 512 p.
- 15. *Huot Y., Babin M.* Overview of fluorescence protocols: theory, basic concepts, and practice // Chlorophyll *a* fluorescence in aquatic sciences: Methods and applications: Springer, 2010. P. 31–74.
- 16. *Jeffrey S.W., Humphrey G.F.* New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c1* and *c2* in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und physiologie der pflanzen. 1975. V.167. № 2. P. 191–194.
- 17. *Kirk J.T.O.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Third edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 649 p.
- Kishino M., Takahashi N., Okami N., Ichimura S. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea // Bulletin of Marine Science. 1985. V. 37. P. 634–642.
- 19. *Kolber Z., Falkowski P.G.* Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis in situ // Limnology and Oceanography. 1993. V. 38. № 8. P. 1646–1665.
- 20. *Krause G.H., Vernotte C., Briantais J.M.* Photoinduced quenching of chlorophyll fluorescence in intact chloroplasts and algae. Resolution into two components // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics. 1982. V. 679. № 1. P. 116–124.
- 21. *Krause G.H., Jahns P.* Non-photochemical energy dissipation determined by chlorophyll fluorescence quenching: characterization and function // Chlorophyll *a* fluorescence: Springer, 2004. P. 463–495.
- 22. *MacIntyre H.L., Kana T.M., Anning J., Geider R.* Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria // Journal of Phycology. 2002. V. 38. № 1. P. 17–38.
- 23. *Masojidek J., Torzillo G., Koblížek M. et al.* Photoadaptation of two members of the Chlorophyta (Scenedesmus and Chlorella) in laboratory and outdoor cultures: changes in chlorophyll fluorescence quenching and the xanthophyll cycle // Planta. 1999. V. 209. № 1. P. 126–135.
- 24. *Maxwell K., Johnson G.N.* Chlorophyll fluorescence a practical guide // Journal of experimental botany. 2000. V. 51. № 345. P. 659–668.
- 25. *Morel A., Bricaud A.* Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1981. V. 28. № 11. P. 1375–1393.
- 26. *Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A.* (eds) Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer, Cham. 2021. 455 p.
- 27. *Morrison J.R.* In situ determination of the quantum yield of phytoplankton chlorophyll a fluorescence:

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

A simple algorithm, observations, and a model // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. № 2. P. 618– 631.

- 28. *Muller P., Li X.P., Niyogi K.K.* Non-photochemical quenching. A response to excess light energy // Plant physiology. 2001. V. 125. № 4. P. 1558–1566.
- 29. *Neeley A.R., Mannino A.* Ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation (v. 1. 0). Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient. 2018.
- Schmechtig C., Poteau A., Claustre H. et al. Processing bio-Argo chlorophyll-A concentration at the DAC level. Version 1.0. 30 September 2015. 2015.
- 31. *Stepanova S.V., Polukhin A.A., Borisenko G.V. et al.* Hydrochemical structure of waters in the Northern Weddell Sea in Austral summer 2020 // Antarctic Peninsula region of the southern ocean. Springer, 2021. P. 159–174.
- 32. *Strasser R.J., Alaka Srivastava, Tsimilli-Michael M.* The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples // Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaptation. 2000. P. 445–483.
- 33. *Suggett D.J., Prášil O., Borowitzka M.A.* Chlorophyll *a* Fluorescence in aquatic sciences: methods and applications. Springer, 2010. 323 p.

Concentration and Fluorescence of Chlorophyl a in the Atlantic Sector of Antarctic

N. A. Moiseeva^{*a*, #}, T. Ya. Churilova^{*a*}, T. V. Efimova^{*a*}, E. Yu. Skorokhod^{*a*}, V. A. Artemiev^{*b*}, A. V. Iushmanova^{*b*}

^aA.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia ^bShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia [#]e-mail: moiseeva@ibss-ras.ru

The studies were carried out in cruise 79 of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh*. The variability of the chlorophyll a specific light absorption coefficient of phytoplankton and the coefficient of correlation between the fluorescence intensity and chlorophyll a concentration at various optical depths under basic lighting conditions and after dark adaptation was studied. It is shown that in the absence of water stratification, there is no vertical variability in the chlorophyll a specific light absorption coefficient of phytoplankton. It was found that when measuring the intensity of chlorophyll a fluorescence with a submersible sensor, without preliminary dark adaptation, a decrease in the fluorescence intensity signal in the upper layer of water is observed, which is associated with the effect of illumination on the fluorescence quantum yield.

Keywords: chlorophyll *a*, fluorescence, submersible sensor, light absorption by phytoplankton pigments, Antarctica

——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 504.064.37

РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ФОТИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТА НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА

© 2023 г. А. А. Латушкин^{1,} *, П. А. Салюк^{2, 3}, В. В. Суслин¹, О. В. Мартынов¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия ²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: sevsalat@gmail.com Поступила в редакцию 01.12.2022 г. После доработки 20.02.2023 г. Принята к публикации 27.03.2023 г.

Предложена методика построения регионального алгоритма расчета толщины фотического слоя по *in situ* измерениям вертикальных профилей показателя ослабления направленного света при условии однопараметричности оптических свойств воды (воды первого типа). С использованием предложенной методики разработан региональный алгоритм определения толщины фотического слоя по результатам синхронных измерений профилей показателя ослабления направленного света и фотосинтетически активной радиации, выполненных в январе—феврале 2022 г. в рамках 87 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" для северо-западной части моря Уэдделла. Для этого региона получено уравнение, позволяющее оценить толщину фотического слоя с относительной ошибкой восстановления 18%.

Ключевые слова: Антарктический полуостров, региональный алгоритм, показатель ослабления направленного света, толщина фотического слоя, фотическая глубина, Южный океан **DOI:** 10.31857/S0030157423040081, **EDN:** YLURZK

введение

Для целого ряда работ как прикладного, так и научного характера в период экспедиционных исследований, проводимых гидрооптиками, гидробиологами, экологами и другими специалистами, необходима оперативная оценка толщины фотического слоя (Z_{eu}) для конкретной станции [2-4, 8, 18, 19, 22, 24]. Если это делать, опираясь на измерения профилей фотосинтетически активной радиации (ФАР) как функции глубины, или проводить оценку на основе измерений глубины белого диска, то такие измерения связаны с рядом объективных трудностей [1, 7, 9, 16]. Например, измерения ФАР и глубины белого диска бессмысленно проводить в вечерние и ночные часы из-за низкой естественной освещенности, качество измерений в лневное время зависит от изменчивости состояния облачного покрова в процессе измерений на конкретной станции, состояния взволнованной поверхности, влияния положения судна относительно солнца, качки судна, метеоусловий и др. В этом отношении измерения

показателя ослабления направленного света (ПОС) более надежны и свободны от перечисленных выше недостатков.

В водах первого оптического типа, где оптические свойства вод можно представить в виде функции, которая зависит от одного параметра – концентрации хлорофилла "а" [23], вместо измерений ПОС можно использовать in situ измерения концентрации хлорофилла "а". Однако в практике морских исследований для оценки последних используются флуоресцентные измерения, которые подвержены тушению флуоресценции при высоких уровнях ФАР [5], а также могут зависеть от видового состава и состояния фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона [17]. С этой точки зрения измерения ПОС направленного света также являются более надежными и могут быть измерены с хорошей точностью при использовании лазерных источников света. Поэтому нахождение связи между профилем ПОС и Z_{еи}, там, где это возможно, о чем речь пойдет ниже, является актуальной и востребованной задачей.



Рис. 1. Схема расположения океанографических станций и толщина фотического слоя *Z*_{eu} рассчитанная по данным прямых *in situ* измерений профилей ФАР.

Таким образом, постановка задачи этой работы заключалась в следующем:

1) развить методику построения регионального алгоритма нахождения Z_{eu} на основе *in situ* измерений профиля ПОС для конкретного района, чтобы впоследствии можно было ее распространить на другие регионы;

2) построить региональный алгоритм расчета толщины фотического слоя на основе синхронных измерений ПОС и ФАР для северо-западной части моря Уэдделла.

Северо-западная часть моря Уэдделла является удаленным регионом, сложным для проведения морских экспедиционных исследований. Здесь частая облачность, перемещение битого льда, низкие углы Солнца над горизонтом, штормовые условия и выпадения осадков затрудняют применение прямых методов определения Z_{eu}. Поэтому для повышения эффективности дорогостоящих рейсов научно-исследовательских судов необходимы методика и региональный алгоритм, которые позволят оперативно оценивать Z_{eu} практически при любых условиях окружающей среды. Кроме этого, данная методика и соответствующие алгоритмы могут быть использованы на автономных погружаемых аппаратах, таких, например, как сеть буев bio-Argo, что также повысит эффективность морских исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках программы экспедиционных исследований 87 рейса НИС "Академик Мстислав Кел-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

дыш" в январе-феврале 2022 г. [6] выполнены натурные синхронные измерения профилей ПОС на 660 нм (ПОС₆₆₀) и ФАР, в основном, в северозападной части моря Уэдделла (шельфовая часть, бассейн Пауэлла и районы около Южных Оркнейских островов) и частично в прилегающих районах (проливы Брансфилда и Антарктика) (рис. 1). Также на рис. 1 цветом обозначена глубина Z_{eu} , рассчитанная по данным прямых *in situ* измерений ФАР.

Натурные измерения профилей ΠOC_{660} и ФАР, как функции глубины морской толщи *z* ($\Pi OC_{660}(z)$ и ФАР(*z*)), выполнялись на дрейфовых станциях с использованием зондирующего измерителя Кондор [10, 11]. Калибровка канала ΠOC_{660} осуществлялась в лабораторных условиях перед экспедицией по результатам измерений в растворах суспензии формазина с заданной концентрацией (единицы FTU). Калибровочные коэффициенты для датчика ФАР комплекса Кондор были получены по результатам синхронных измерений с датчиком ФАР фирмы LI-COR LI-192 [21], выполненные непосредственно в рейсе.

Нижеописанная методика построена на том, что в рассматриваемом районе исследований оптические свойства воды принадлежат к водам первого типа (CASE 1) [13, 15], т.е. существует однопараметрическая связь между всеми первичными гидрооптическими характеристиками в фотическом слое моря. Это связано с тем, что в основном в данном районе отсутствуют существенные источники поступления окрашенных

растворенных органических веществ (ОРОВ) и взвешенных веществ, не связанных с функционированием фитопланктонных сообществ. При этом исключением являются морские воды, значимо подверженные влиянию таяния ледников вследствие чего понижается соленость и повышается коэффициент обратного рассеяния света морской воды за счет поступления минеральных взвешенных веществ, что было зафиксировано в водах около Антарктического полуострова в работе [12]. Тем не менее, такие процессы носят локальный характер, и основная часть вод относится к водам CASE 1. Однако несмотря на это глобальные биооптические алгоритмы в данном районе все равно не применимы, т.к. район характеризуется особыми региональными гидрооптическими характеристиками, которые приводят к тому, что спутниковые оценки концентрации хлорофилла "а" существенно занижены [14, 28]. Это говорит о том, что и алгоритм для оценки толщины фотического слоя также будет иметь отличительные региональные особенности.

Методика настройки регионального алгоритма расчета толщины фотического слоя с использованием данных вертикального зондирования ПОС состоит из трех этапов.

(1) На первом этапе осуществляется расчет Z_{eu} по измеренному профилю $\Phi AP(z)$, т.е. находится горизонт, для которого отношение $\Phi AP(Z_0)/\Phi AP(0^-)$ равно 0.01. Тогда Z_0 равно искомому значению Z_{eu} .

(2) На втором этапе выполняется расчет интеграла профиля $\Pi OC_{660}(z)$ от верхнего слоя до глубины Z_{eu} , вычисленной по синхронному профилю $\Phi AP(z)$, с весовой функцией z^{α} :

$$\int_{1}^{Z_{eu}} \Pi OC_{660}(z) z^{\alpha} dz = A(\alpha),$$
 (1)

где α принимает значения в интервале $\alpha = -3 \div 0.5$ с шагом 0.1. Такая процедура из двух шагов выполняется для всех синхронных измерений профилей ПОС₆₆₀(*z*) и ФАР(*z*) для рассматриваемого района. В результате получается двумерная матрица от α и номера станции *s*. Использование предложенной весовой функции позволяет рассмотреть такие крайние случаи, как использование ПОС₆₆₀(*z*) в основном с поверхности при $\alpha = -3$ или равномерный учет ПОС₆₆₀(*z*) во всем диапазоне глубин при $\alpha = 0$, либо вариант увеличения веса ПОС₆₆₀(*z*) с глубиной при $\alpha > 0$.

(3) На третьем этапе определяется минимум функции $\frac{\text{CKO}(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$ по всем станциям для фиксированного α , где CKO(...) – среднеквадратичное отклонение, а символ $\langle ... \rangle$ – среднее значение. Пусть min $\left(\frac{\text{CKO}(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}\right)$ по α достигается для α_0 ,

тогда для α_0 рассчитывается константа $\langle A(\alpha_0) \rangle$:

$$\langle A(\alpha_0) \rangle_{s} = \left\langle \int_{1}^{Z_{eu}} \Pi OC_{660}(z) z^{\alpha_0} dz = A(\alpha) \right\rangle_{s},$$
 (2)

которая в дальнейшем используется нами для расчета модельного значения Z_{eu}^* , используя только профиль ПОС(*z*). Далее считаем, что $\langle A(\alpha_0) \rangle_{s} \equiv A(\alpha_0)$.

Таким образом, как только интеграл $\int_{1}^{Z} \Pi OC(z) \times$

× $z^{\alpha_0} dz$ для какой-то станции достигнет величины $A(\alpha_0)$, то эта глубина Z и будет соответствовать модельной оценке нижней границы фотического

слоя Z_{eu}^* для данного района/сезона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет для всех станций значения $\frac{\text{CKO}(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$

как функции α показан на рис. 2. Минимальное значение функции достигается для $\alpha_0 = -0.8$. При этом $A(\alpha_0) = 2.57$. Из весовой функции, представленной на рис. 26 видно, что наиболее значимые глубинные горизонты с вкладом более 0.5% находятся в диапазоне 0–40 метров.

На рис. 3 показан результат сравнения модель-

ного расчета Z_{eu}^* и измеренного *in situ* Z_{eu} для всех синхронных измерений профилей ФАР и ПОС в районе исследований. Наблюдается высокая корреляционная связь ($R^2 = 0.90$, N = 21, средняя относительная ошибка – 18%) между измеренной и модельной оценками толщины фотического слоя.

Расположение наиболее значимых глубинных горизонтов для расчета вклада ПОС при оценке Z_{eu}^* в диапазоне 0—40 м соответствует тому факту, что в районе исследований основное количество оптически-активных компонентов (исключая чистую воду) находится примерно в этом же диапазоне глубин [20].

В данной работе качество оценки Z_{eu}^* выше $(R^2 = 0.90)$, чем наилучший результат оценки Z_{eu}^* из контактных измерений приведенный в работе [25], где $R^2 = 0.83$ при использовании поверхностных измерений ПОС на длине волны 532 нм, полученных в 79 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" (АМК79) в январе—феврале 2020 г. Конечно, нельзя сравнивать эти результаты напрямую, поскольку измерения проведены в разных

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023



Рис. 2. (а) Функциональная связь между $\frac{\text{CKO}(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$ и α , построенная по данным синхронных измерений профилей ФАР и ПОС в районе исследований. (б) Вид весовой функции при $\alpha = -0.8$.

рейсах в разные года, хотя и в один и тот же сезон. И кроме этого, в рейсе АМК79 использовались только поверхностные измерения на горизонте около 5 м. Но это показывает, что в обоих случаях получены высокие значения R^2 при использовании измерений ПОС. В работе [25] использование *in situ* измерений интенсивности флуоресценции хлорофилла "а" привело к большей погрешности оценки толщины фотического слоя.

Отдельным вопросом для обсуждения является длина волны, на которой измеряется ПОС. В данной работе — это 660 нм, и ПОС на ней в основном зависит от поглощения света клетками фитопланктона, а также от рассеяния на живых и неживых взвешенных частицах. Вкладом ОРОВ в поглощение света при этом можно пренебречь. Это допустимо, если мы говорим о разработке модели для вод первого типа. Если же нужна модификация методики для применения в водах



Рис. 3. Сравнение модельного расчета Z_{eu}^* и измеренного *in situ* Z_{eu} для всех синхронных измерений профилей ФАР и ПОС в районе исследований.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

второго типа с большим вкладом OPOB, то необходимо добавлять второй канал измерения на длине волны в диапазоне 350–450 нм. Кроме этого, в районе исследований могут присутствовать локальные области с высоким содержанием фикоэритрина в составе криптофитовых водорослей [26]. Фикоэритрин поглощает свет в диапазоне 490–500 и 550–560 нм [27] и для его учета необходимо добавлять еще один канал измерений в диапазоне 490–560 нм, где поглощение будет также значимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описана методика восстановления *Z*_{eu} по измеренным профилям ПОС по формуле.

2. Для северо-западной части моря Уэдделла опробовано применение данной методики, полу-

чено уравнение для оценки Z_{eu}^* : $\int_1^{Z_{eu}^*} \Pi OC(z) z^{-0.8} dz = 2.57$. Относительная ошибка восстановления Z_{eu}^* составила 18%.

Источники финансирования. Экспедиционные исследования выполнены в рамках государственных заданий: МГИ РАН по теме № FNNN-2022-0001 "Экспериментальные исследования изменчивости гидрофизических, гидрохимических и биооптических полей на разных пространственно-временных масштабах для выявления особенностей климатических изменений океанографических условий в Атлантической части Антарктики" и теме № FNNN-2021-0003 "Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений"; ТОИ ДВО РАН по теме № 0211-2021-0007 "Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере" и теме № FWMM-2022-0033 "Комплексные исследования окружающей среды и климата Южного океана". Биооптические характеристики проанализированы в рамках проекта РНФ № 21-77-10059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ведерников В.И. Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в летний период // В кн.: Изменчивости экосистемы пелагиали Черного моря и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 128–147.
- 2. Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 1–15.
- 3. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Влияние спектра солнечной радиации на эволюцию биосферы // Вестник Российской академии наук. 2005. Т. 75. № 6. С. 522–532.
- 4. Маньковский В.И., Шерстянкин П.П. Использование гидрооптических характеристик для контроля состояния экосистемы водоемов // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 86–94. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(86-94)
- 5. Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Маторин Д.Н. Коррекция тушения флуоресценции хлорофилла а в верхнем перемешанном слое моря: разработка алгоритма // Морской гидрофизический журнал 2020. Т. 36. № 1(211). С. 66–74.
- 6. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в Атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825–827.
- Празукин А.В., Латушкин А.А., Фирсов Ю.К., Чепыженко А.А. Вертикальное распределение фотосинтетически активной радиации в пологе Zostera noltii Hornemann при разной высоте Солнца над горизонтом // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. XXVII Междунар. симпоз., 5– 9 июля 2021 г., г. Москва, РФ. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. С. С330–С333. https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/27/C.pdf
- 8. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Латушкин А.А. и др. Фотосинтетически активная радиация на дне северозападного шельфа Черного моря на основе региональных моделей и спутниковых данных и ее межгодовая изменчивость // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 68–77. https://doi.org/10.7868/S2073667320030053
- Тоомине Х.Г., Гуляев Б.И. Методика измерения фотосинтетически активной радиации // М.: Наука, 1967. 144 с.
- Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Инструментальные средства биофизического мониторинга Мирового океана // Материалы 15 Всероссийской

научно-технической конференции "Современные средства океанологических исследований" МСОИ-2017. Москва. 2017. Т. 2. С. 45–49. https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-1-95-101

- Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Методы и средства экологического мониторинга in situ параметров состояния водной среды и антропогенной нагрузки // Сборник статей научно-практической конференции с международным участием "Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность 2017", 11–15.09.2017 г. ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет", Институт ядерной энергии и промышленности. Севастополь. 2017. С. 1491–1495.
- Dierssen H.M., Smith R.C. Case 2 Antarctic coastal waters: The bio-optical properties of surface meltwater // Proceedings Ocean Optics XV, edited by S Ackleson and J Marra, Off of Nav Res, Kailua-Kona, Hawaii. 2000.
- 13. Dierssen H.M. Smith R.C., 2000a. Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. № C11. P. 26301–26312.
- 14. Ferreira A., Brito A.C., Mendes C.R. et al. OC4-SO: A New Chlorophyll-a Algorithm for the Western Antarctic Peninsula Using Multi-Sensor Satellite Data // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 5. P. 1052. https://doi.org/10.3390/rs14051052
- Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A. Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 2018. V. 149. P. 138–149.
- Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Appl. Optics. 1975. V. 14. P 413–416. https://doi.org/10.1364/AO.14.000413
- Huot Y., Franz B.A., Fradette M. Estimating variability in the quantum yield of Sun-induced chlorophyll fluorescence: A global analysis of oceanic waters // Remote sensing of environment. 2013. V. 132. P. 238–253. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.003
- Kirk J.T.O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd Edition // Cambridge: University Press UK. 2011. 649 p.
- Kovač Ž., Platt T., Sathyendranath S., Morović M. Analytical solution for the vertical profile of daily production in the ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. № 5. P. 3532–3548. https://doi.org/10.1002/2015JC011293
- Latushkin A.A., Artemiev V.A., Garmashov A.V. et al. Variability of Seawater Optical Properties in the Adjacent Water Basins of the Antarctic Peninsula in January and February 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer, Cham, 2021. P. 229– 240.
- 21. LI-COR LI-192 Underwater PAR Sensor. URL: https://www.fondriest.com/li-cor-li-192-underwaterpar-sensor.htm (дата обращения 22.08.2022).
- 22. *Miller C.B., Wheeler P.A.* Biological oceanography // John Wiley & Sons. 2012. 504 p.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

- Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color 1 // Limnology and oceanography. 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
- 24. Ocean Productivity home page. (2017). URL: http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php (дата обращения 22.08.2022).
- 25. Salyuk P.A., Artemiev V.A., Glukhovets D.I. et al. Bio-Optical Models for Estimating Euphotic Zone Depth in the Western Atlantic Sector of the Southern Ocean in the Antarctic Summer // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. – Springer, Cham, 2021. P. 241– 250.
- 26. Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Mayor A.Y. et al. Phycoerythrin Pigment Distribution in the Upper Water Lay-

er Across the Weddell-Scotia Confluence Zone and Drake Passage Summer // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer, Cham, 2021. P. 251–259.

- 27. Six C., Thomas J.C., Garczarek L. et al. Diversity and evolution of phycobilisomes in marine /Synechococcus spp.: a comparative genomics study // Genome Biology. 2007. V. 8. № 2. R259. https://doi.org/10.1186/gb-2007-8-12-r259
- 28. Szeto M., Werdell P.J., Moore T.S., Campbell J.W. Are the world's oceans optically different? // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. № C7. https://doi.org/10.1029/2011JC007230

A Regional Algorithm for Calculating the Photic Zone Thickness from the Vertical Profile of the Beam Attenuation Coefficient on the Example of the Northwestern Part of the Weddell Sea

A. A. Latushkin^{a, *}, P. A. Salyuk^{b, c}, V. V. Suslin^a, O. V. Martynov^a

^aMarine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia ^bIlichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia ^cShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *e-mail: sevsalat@gmail.com

A method is proposed for constructing a regional algorithm for calculating the thickness of the euphotic zone from *in situ* measurements of the vertical profiles of the beam attenuation coefficient under the condition of one-parameter optical properties of water (Case-1 water). Using the proposed methodology, a regional algorithm for determining the thickness of the photic zone was developed based on the results of synchronous measurements of the beam attenuation coefficient and photosynthetically active radiation, performed in January 2022 as part of the 87th cruise of the R/V Akademik Mstislav Keldysh for the northwestern part of the Weddell Sea. For this region, an equation was obtained that makes it possible to estimate the photic zone depth with a relative reconstruction error of 18%.

Keywords: Antarctic Peninsula, regional algorithm, beam attenuation coefficient, photic zone thickness, euphotic zone depth, Southern Ocean

УДК 574.5(262.54)

СТРУКТУРА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЗОЗООПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ В АТЛАНТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА

© 2023 г. В. В. Касьян*

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток, Россия *e-mail: valentina-k@yandex.ru Поступила в редакцию 02.12.22 г. После доработки 13.12.2022 г. Принята к публикации 15.02.2023 г.

В работе приведены результаты исследования мезозоопланктона у побережья Антарктического п-ова, в проливах Брансфилда и Антарктик, в бассейне Пауэлла моря Уэдделла и у Ю. Оркнейских о-вов в период южного лета 2022 г. Сообщества мезозоопланктона представлены двумя лидирующими группами с доминантными таксонами: копеподы (*Oithona* spp., *Metridia gerlachei* и *Calanoides acutus*) и эвфаузииды (*Euphausia superba*). Максимальные значения численности и биомассы мезозоопланктона отмечены над глубоководными желобами у Ю. Оркнейских о-вов в теплой Антарктической поверхностной воде (AASW), минимальные значения – у Антарктического п-ова в холодных модифицированных водах моря Уэдделла (TWW). Максимальные концентрации копепод наблюдались в прол. Брансфилда у Ю. Шетландских о-вов при поверхностной температуре (SST) $-0.5-0.5^{\circ}$ С и солености (SSS) 34.5-34.6%; икры и личинок *E. superba* на разных стадиях развития – у Ю. Оркнейских о-вов при значениях SST $1-2^{\circ}$ С и SSS 34.3-34.5%. Выделены четыре группы сообществ, различающиеся по составу, обилию и доминированию таксонов. Результаты исследований имеют значение для мониторинга экосистемы Южного океана.

Ключевые слова: мезозоопланктон, копеподы, *Euphausia superba*, Атлантический сектор, Южный океан

DOI: 10.31857/S0030157423040056, EDN: YKIPFE

введение

В последние десятилетия Антарктический п-ов и окружающие его моря претерпевают существенные перестройки в связи с глобальными изменениями климата [7]. Самым заметным следствием этих изменений является колоссальное сокращение площади ледового покрова и доли многолетних льдов [46]. В Южном океане наблюдается значительное потепление, с 1955 г. температура верхних слоев океана к западу от Антарктического п-ова повысилась более чем на 1°С [30]. Деградация ледового покрова влечет за собой изменение условий окружающей среды, продолжительности продукционного периода, структуры и распространения планктонных сообществ. Биота Южного океана сейчас, несомненно, находятся в состоянии трансформации [20, 21, 24, 29, 37, 51]. Мезозоопланктон является важнейшим звеном в пищевой цепи между первичными продуцентами и высшими трофическими уровнями, в том числе и промысловыми. Его биомасса определяет количество ресурсов, доступных для планктоядных рыб, птиц

и морских млекопитающих. Планктонные организмы характеризуются короткими жизненными циклами и первыми могут реагировать на климатические изменения, поэтому их можно рассматривать как индикаторы состояния хрупкой антарктической экосистемы. Чтобы прогнозировать возможные изменения в пелагиали Южного океана в будущем, необходимо ежегодное накопление сведений о сообшествах. структуре и количественных характеристиках, а также связях с параметрами внешней среды. Цель данного исследования – изучить пространственное распределение и обилие мезозоопланктонных сообществ в Атлантическом секторе Антарктики и выделить основные параметры окружающей среды, регулирующие их распространение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использован материал, собранный в ходе 87-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" у Антарктического п-ова, в проливах Брансфилда и Антарктик, в бассейне Пауэлла мо-



Рис. 1. Карта-схема района сбора планктонных проб с помощью сетей Multinet, WP-2 и Bongo с наложением на водные массы: АСС – Антарктическое Циркумполярное Течение, ВС – Течение Брансфилда, АСоС – Антарктическое Прибрежное Течение, АSF – Антарктический Шельфовый Фронт, WF – Фронт Уэдделла и DWW – Глубинная вода моря Уэдделла [22, 35, 48]. Цифрами обозначены номера станций.

ря Уэдделла и у Южных Оркнейских о-вов южным летом в январе-феврале 2022 г. Планктонные пробы отбирались с помощью сетей Multinet (площадь входного отверстия 0.25 м², размер ячеи 150 мкм), WP-2 (0.25 м², 150 мкм) и Bongo (0.25 м², 505 мкм). Буксировка сетей Multinet и WP-2 проводились вертикально, сети Bongo – путем выполнения косой буксировки с 200-300 м на поверхность со средней скоростью 1.5 узла. Объем профильтрованной воды измерялся с помощью счетчика (Hydrobios, Германия). Закрывающейся системой сетей Multinet на каждой станции отбирались 5 проб из разных горизонтов свыше 1000 м до поверхности. В мелководных районах отбор проб осуществлялся сетями WP-2 и Bongo (рис. 1). Всего с помощью различных сетей было отобрано 119 планктонных проб на 23 комплексных станциях. Для определения видового состава, подсчета численности и биомассы мезозоопланктона свежую пробу после подъема на борт просматривали под бинокулярным микроскопом SZX7 (Olympus, Japan) и позже фиксировали 4% раствором формальдегида. Представителей мезозоопланктона по возможности идентифицировали до самого низкого таксономического уровня [11, 52]. Копеподы, как доминантная группа мезозоопланктона, была подвергнута более детальной таксономической обработке с помощью Marine Planktonic Copepods database [40]. Стадии личиночного развития эвфаузиид идентифицировали с помощью определителей [2, 4]. Биомассу мезозоопланктона рассчитывали с использованием эталонных значений средней массы видов [32]. Полученные величины выражены в миллиграммах сырой массы на 1 м³ (мг/м³). Гидрофизические параметры окружающей среды в изученной акватории, измеренные с помощью зонда Idronaut OCEAN SEVEN 320Plus (Idronaut, Italy), были проанализированы ранее [10, 18, 26].

Многофакторный анализ выполнен с использованием программы PRIMER ver. 6 [12]. Для построения матрицы сходства использовали индекс Брея-Кёртиса, вычисленный на основе данных по численности (экз./м³) организмов в пробах. Для уменьшения влияния доминант, исходные данные были трансформированы извлечением квадратного корня. Кластеризация выполнена методом попарного внутригруппового невзвешенного среднего (UPGMA). Для оценки надежности результатов кластеризации проводили тест SIMPROF (число повторов 999, p = 0.05) [12]. При вычислении разнообразия мезозоопланктона на станциях использовали индекс разнообразия Shannon-Weaver index (H'). Взаимосвязь между количественными характеристиками мезозоопланктона и параметрами внешней среды была проанализирована с использованием ранговой корреляции Спирмена с использованием программы Statistica 10 (StatSoft Power Solutions, Inc.). Коэффициент корреляции считали значимым при уровне достоверности (p < 0.05). Карты распределения численности и биомассы построены с помощью программы Ocean Data View 4.5.



Рис. 2. Численность, экз./м³ (а), биомасса, мг/м³ (б) и соотношение, % основных таксонов (в, г) мезозоопланктона в январе-феврале 2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мезозоопланктон представлен 42 видами из 11 крупных таксономических групп, среди которых преобладали копеподы (49% от общей численности и 18% от общей биомассы) и личинки антарктического криля *E. superba* (44 и 68%, соответственно). Общая численность мезозоопланктона варьировала от 47.3 до 2840.6 экз./м³, при среднем значении 1001.2 \pm 469.4 экз./м³ (рис. 2а). Суммарная биомасса мезозоопланктона колебалась от 20.1 до 13343.1 мг/м³, при среднем значе-

нии 2643.7 $\pm \pm$ 935.1 мг/м³ (рис. 26). Максимальные значения численности, биомассы и видового разнообразия мезозоопланктона отмечены у Ю. Оркнейских о-вов, а минимальные — в проливе Брансфилда у Антарктического п-ова. Число таксонов увеличивалось в восточном направлении от 7 (ст. 7318) до 27 (ст. 7382), а общее видовое разнообразие сообществ (*H*') в целом было низким — от 0.684 до 2.253.

В сообществах мезозоопланктона значительную долю составляли копеподы (*Calanoides acutus*,



Рис. 3. Вертикальное распределение средней численности (экз./м³) основных таксономических групп/видов мезозоопланктона в январе-феврале 2022 г.

Calanus propinquus, Metridia gerlachei, Oithona spp. и Rhincalanus gigas), которые были многочисленны в прол. Брансфилда у Ю. Шетландских о-вов и в бассейне Пауэлла. Скопление икры криля *E. superba* наблюдалось в трех районах: в южной глубоководной части прол. Антарктика, над юго-западным и северо-восточным склонами бассейна Пауэлла; личинок *E. superba* – у Ю. Оркнейских о-вов (рис. 2в, 2г).

Сообщества мезозоопланктона в изученной акватории отличались определенной вертикальной структурой. Максимальные показатели средней численности мезозоопланктона наблюдались в поверхностном слое (200-0 м), где преобладали икра, личинки криля E. superba и копеподы Oitho*па* spp. (рис. 3). Исключением были воды прол. Антарктика и в бассейне Пауэлла, где высокие концентрации икры и науплиусов криля отмечены на значительной глубине (1000-500 м) (табл. 1). Относительно высокие показатели средней численности мезозоопланктона характерны для 500-200 м слоя воды, где основу формировали крупные антарктические копеподы C. acutus, C. propinquus, M. gerlachei, Amphipoda (гиперииды Themisto gaudichaudii, Primno macropa, Cyllopus magellanicus) и Ostracoda (рис. 3). Исключением были воды над северо-восточным склоном бассейна Пауэлла, где в поверхностном теплом слое (1°С) концентрировались копеподы *C. acutus* и *C. propinquus* (табл. 1). Глубже 500 м наблюдались максимумы численности копепод родов Paraeuchaeta, Euchirella и Rhincalanus, при общем снижении средней численности мезозоопланктона. Сообщества, наблюдаемые глубже 1000 м были немногочисленные, а видовое богатство фауны минимальное (рис. 3).

В изученном регионе выделены четыре группы станций (SIMPROF R = 0.69, p = 0.05%) с характерными сообществами, которые распределены неравномерно (рис. 4а). Сообщества группы А отмечены в северной части прол. Антарктик, над юго-западным и северо-восточным склонами бассейна Пауэлла (рис. 4б) и характеризовались доминированием копепод Oithona spp., M. gerlachei и C. acutus (виды ранжированы по убыванию значимости). Сообщества группы Б локализованы в прол. Брансфилда у побережья Ю. Шетландских о-вов, где наибольшее значение имели копеподы Oithona spp. и M. gerlachei. Сообщества группы В, выделенные в глубоководных частях между Антарктическим п-овом и Ю. Оркнейскими о-вами, характеризовались преобладанием икры и личинок криля E. superba и комплексом копепод, состоящим из C. acutus, Oithona spp. и С. propinguus. И наконец, сообщества группы Г, локализованные в прол. Брансфилда у Антарктического п-ова, представлены в основном копеподами, среди которых особо значимыми были C. acutus и Oithona spp. Сообщества мезозоопланктона, характеризующиеся низкой численностью и видовым разнообразием, не вошли ни в одну из групп (рис. 4б).

Сопоставляя расположение выделенных сообществ мезозоопланктона со структурой вод, отмечено, что сообщества (А и В), встречающиеся в прол. Антарктика, между Антарктическим п-овом и Ю. Оркнейскими о-вами, находились в условиях типичных вод моря Уэдделла, которые состояли из трех слоев — теплой Антарктическая поверх-



Рис. 4. Результаты кластерного анализа данных по численности (а) и географическое распространение выделенных групп (б). Группы: $\bullet - A$, $\blacktriangle - B$, $\blacksquare - F$, $\bigcirc - H$, $\square - F$, $\bigcirc - H$, $\square - F$, $\bigcirc - H$, $\square - H$

ностная воды (AASW), холодного промежуточного слоя (CIL) и теплой глубинной воды (WDW) [17, 36]. При этом, сообщества А, встречающиеся в северной части прол. Антарктика и над юго-западным и северо-восточным склонами бассейна Пауэлла находились в холодной и пресной модификации AASW. Напротив, сообщества В, выделенные в глубоководных частях прол. Антарктика, в бассейне Пауэлла и у Ю. Оркнейских о-вов, находились в теплой и соленой модификации AASW. Сообщества Б, встречающиеся в прол. Брансфилда у Ю. Шетландских о-вов, отмечены в теплой воде течения Брансфилда (ВС) [49, 54]. Сообщества Г, встречающиеся в прол. Брансфилда у Антарктического п-ова, наблюдались в холодных модифицированных водах моря Уэдделла (TWW), переносимых Антарктическим Прибрежным Течением (АСоС) [16]. Сообщества, не вошедшие ни в одну из групп, отмечены на границе сплоченных льдов в холодных (до -1.7° С) и распресненных (33.5‰) шельфовых водах (SW) в зоне локального максимума хлорофилла *а*.

Корреляционные связи между средними значениями численности и биомассы мезозоопланк-

Район	Слой, м	Calanoides acutus	Calanus propinquus	Metridia gerlachei	Oithona spp.	<i>E. superba</i> (eggs, nauplii)	<i>E. superba</i> (larvae)	Другие таксоны
Ст. 7332	50-0	7.8	—	0.7	15.6	52.6	20.1	4.9
	100-50	10.5	_	3.9	52	47.8	16	6.6
	200-100	13.1	1.8	8.8	31.8	95.6	16.3	7.8
	500-200	6.5	1.6	5.3	16.9	270.1	76.5	23.2
	800-500	3.9	_	3.5	_	334.7	30.5	12.3
Ст. 7348	100-0	3.1	2.4	0.1	0.7	—	0.9	2.2
	200-100	0.7	0.1	0.05	0.5	0.8	0.06	6.9
	500-200	12.2	0.02	1.5	36.5	32.5	62.4	10.1
	1000-500	24.3	7.4	1.4	243.2	650.3	130.8	6.2
	1500-1000	—	0.06	0.03	21.1	—	_	0.8
Ст. 7370	50-0	375.2	160.2	_	163.6	1112	469.2	0.9
	100-50	14.9	0.5	1.2	5.8	—	0.2	2.3
	200-100	11.1	0.4	0.1	5.5	—	5.8	6.9
	300-200	3.5	0.5	0.2	5.1	—	0.8	8.4
	500-300	—	0.3	0.6	4.3	—	0.1	4.4

Таблица 1. Численность (экз./м³) доминантных таксонов мезозоопланктона в проливе Антарктика (ст. 7332), над юго-западным (ст. 7348) и северо-восточным (ст. 7370) склонами бассейна Пауэлла моря Уэдделла

	SST	200 m T	500 m T	SSS	200 m S	500 m S	Chl a
N Meso	0.380	-0.056	0.182	-0.162	0.454	0.350	0.059
B Meso	0.366	0.009	0.271	-0.277	0.311	0.521	0.084
N Cop	0.291	-0.004	0.139	0.077	0.263	-0.346	0.006
B Cop	0.143	-0.019	0.296	-0.069	0.182	0.128	-0.043
N E. superba	0.082	-0.390	0.296	-0.369	0.335	0.415	-0.041
(eggs, nauplii, larvae)							
B E. superba	0.173	-0.258	0.353	-0.258	0.358	0.423	-0.047
(eggs, nauplii, larvae)							

Таблица 2. Корреляция Спирмена (Spearman's rank order Correlations) между количественными характеристиками мезозоопланктона и параметрами внешней среды

Примечание: *T* – температура (°C), S – соленость (‰), Chl *a* – хлорофилл *a* (мг/м³), *N* – численность (экз./м³), B – биомасса (мг/м³), Meso – мезозоопланктон, Cop – копеподы. Жирным шрифтом выделены значимые значения (p < 0.05).

тона, численностью криля *E. superba* на различных личиночных стадиях и соленостью на глубине 200 м (200 m S) и 500 м (500 m S) были положительными и достоверными. Достоверная отрицательная связь отмечена между численностью икры и личинок криля *E. superba* и поверхностной соленостью (SSS) и температурой воды на глубине 200 м (200 m T), а также между численностью копепод и соленостью (500 m S) (табл. 2). Из общего количества изученных корреляционных зависимостей установлено 6 достоверных связей, которые в равной степени могут отражать изменения численности и биомассы доминантных групп мезозоопланктона при изменении параметров внешней среды.

Несмотря на потепление [30] и опреснение поверхностных вод за счет таяния ледников [13, 38], которое в Атлантическом секторе Южного океана привело к изменению сообществ фитопланктона от сообществ с преобладанием диатомовых водорослей к криптофитам и мелким жгутиковым [33, 34] и оказало значительное влияние на криля и сальп [24, 33], структура и распределение сообществ мезозоопланктона в исследуемом регионе в летний сезон 2022 г. по сравнению с данными других лет [28, 35, 36, 51, 53] изменились незначительно. Величина средней численности икры и личинок криля в изученном регионе была в 3-5 раз ниже, чем сообщалось ранее другими исследователями [5, 6, 19]. Возможно, период наших исследований мог совпадать с периодом между волнами миграции криля, когда его численность низкая. На наличие волн высокой и низкой численности криля в Атлантическом секторе Антарктики указывалось ранее [5, 44]. Тем не менее, не исключается и проявление тренда на уменьшение численности криля в связи с климатическими изменениями, который начал наблюдаться еще в конце XX века [5, 9, 24, 44].

Различия, наблюдаемые нами в пространственном распределении сообществ мезозоопланктона, могут быть связаны с неоднородностью водных масс в регионе [18, 26, 35]. Наличие в прол.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

Брансфилда двух различных сообществ мезозоопланктона подтверждает выводы о существовании в этом районе известной разнонаправленной двуструйной системы [27, 42], состоящей из мощного теплого течения ВС, направленного вдоль Ю. Шетландских о-вов на северо-восток, и слабого холодного течения АСоС, направленного на юго-запад. Различия в вертикальном распределении мезозоопланктона могут быть обусловлены сезонной миграцией планктеров, наличием пищи и сезонного пикноклина. Копеподы *C. acutus*, *C. propinguus*. *M. gerlachei*. встречающиеся летом обычно в поверхностном слое 200-0 м [1, 14, 28], в летний период наших исследований были сосредоточены в пределах теплой глубинной воды (500-200 м). Наличие в исследуемой акватории резкого сезонного пикноклина, где градиенты температуры и солености достигали 0.5°C и 0.06‰ на 10 метров, возможно, препятствовали совершению миграции этих видов копепод к поверхности для откорма и размножения. Тем не менее, стратификация водной толщи способствует активной вегетации фитопланктона, как необходимого корма для развития мезозоопланктона [8, 15].

Изменения структуры и обилия мезозоопланктона в Южном океане в наибольшей степени связаны с изменениями биомассы фитопланктона [39, 50]. Дж. Тарлинг с соавторами [47] обнаружили, что копеподы отдают пищевое предпочтение динофлагеллятам, тем самым демонстрируя, что изменение качества пищи и пищевой избирательности могут являться основными факторами, влияющими на стабильность сообществ мезозоопланктона. Высокая численность мезозоопланктона также может быть связана с наличием доступной гетеротрофной пищи, которая входит в биоту морского льда и появляется в летний период во время его таяния [24]. Максимальная численность копепод в изученном районе была сосредоточена в прол. Брансфилда у Ю. Шетландских о-вов, во время сезонного обилия динофлагелят (Phaeocystis antarctica и Polarella glacialis) [26].

Прогрев воды, обилие фитопланктона и высокая концентрация хлорофилла *а* могут являться ключевыми факторами высокой численности другой доминантной группы мезозоопланктона – личинок криля *E. superba* [25, 31, 41, 43, 45]. Летом в 2022 г. максимальные скопления икры и личинок криля, так же как и в другие годы [3, 19, 25], были отмечены на границе морей Уэдделла и Скоша, в прогретых водах у Ю. Оркнейских о-вов. Возможно, часть икры и личинок уэдделловской группировки переносится западной ветвью круговорота Уэдделла и смешивается с группировкой, переносимой водами южной струи АЦТ [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Атлантическом секторе Южного океана в летний сезон 2022 г. мезозоопланктон был представлен 42 видами из 11 крупных таксономических групп, срели которых преоблалали копеподы, икра и личинки антарктического криля E. superba. Численность и биомасса мезозоопланктона увеличивалась в восточном направлении от Антарктического п-ова к Южным Оркнейским о-вам. Максимальные значения численности и биомассы мезозоопланктона отмечены в теплой Антарктической поверхностной воде, минимальные значения, соответственно, отмечены в холодной модифицированной воде моря Уэдделла. Таксономическое разнообразие мезозоопланктона было значительно выше в глубоководных районах, чем в прибрежных зонах у Антарктического п-ова. Выделены четыре группы сообществ мезозоопланктона, которые тесно связаны с неоднородностью водных масс в изученном регионе. Различия в вертикальном распределении мезозоопланктона обусловлены сезонной миграцией планктеров, наличием пищи и стратификацией водной толщи. Корреляционные связи показали, что биомасса мезозоопланктона может увеличиваться с глубиной, при этом изменения значений поверхностной солености и температуры воды могут влиять на изменения численности икры и личинок криля *E. superba*.

Это предварительные результаты комплексного исследования, которые будут подробно проанализированы в последующих публикациях и предоставят бесценную информацию о жизни планктонных организмов в экстремальных условиях изменяющегося Южного океана. Результаты настоящего и будущих исследований будут иметь практическое значение при прогнозировании долгосрочных изменений биоты Южного океана и для разработки будущих оценок и стратегий ее сохранения и управления.

Благодарности. Автор благодарит руководство ИО РАН и начальника экспедиции Морозова Е.Г. за организацию экспедиционных работ, зам. нач. экспедиции Молодцову Т.Н. и Орлова А.М., отряды Планктона и Бентоса за отбор планктонных проб, коллег из ИО РАН, ИнБЮМ РАН, ТОИ ДВО РАН, ННЦМБ ДВО РАН за плодотворные дискуссии, а также капитана и экипаж НИС "Академик Мстислав Келдыш" за всестороннюю помощь.

Источники финансирования: Работа выполнена в рамках темы государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FMWE-2022-0001 и № 122072000067-9 (ННЦМБ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Воронина Н.М. Экосистемы пелагиали Южного океана. 1984. М.: Наука, 206 с.
- 2. *Макаров Р.Р.* Личинки *Euphausia superba* Dana в планктоне моря Скотия // Труды ВНИРО. 1974. Т. 99. С. 84–102.
- 3. *Макаров Р.Р., Меньшенина Л.Л.* Общие черты распределения личинок эвфаузиид в водах Антарктики // Океанология. 1989. Т. 29. № 5. С. 825–831.
- Перцова К.Н. Личинки эвфаузиид Антарктики // Труды института океанологии АН СССР. 1976. Т. 105. С. 147–170.
- 5. Сологуб Д.О. Распределение и возрастной состав личинок эвфаузиид (Euphausiacea) в районе Антарктического полуострова // Труды ВНИРО. 2015. Т. 154. С. 3–15.
- 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.
- Anisimov O.A., Vaughan D.G., Callaghan T.V. et al. Polar regions (Arctic and Antarctic). In: Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P.et al. (eds). Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: University Press, 2007. P. 653– 685.
- Atkinson A. Life cycle strategies of epipelagic copepods in the Southern Ocean // Journal of Marine Systems. 1998. V. 15. Iss. 1–4. P. 289–311. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00081-X
- Atkinson A., Tarling G.A., Shreeve R.S. et al. Natural growth rates in Antarctic krill (*Euphausia superba*). II. Predictive models based on food, temperature, body length, sex, and maturity stage // Limnol. Oceanogr. 2006. V. 51. No. 2. P. 973–987.
- Bitiutskii D.G., Samyshev E.Z., Minkina N.I. et al. Distribution and demography of Antarctic krill and salps in the Atlantic sector of the Southern Ocean during austral summer 2021–2022 // Water. 2022. V. 14. No. 23. 3812.

https://doi.org/10.3390/w14233812

- 11. *Boltovskoy D.* South Atlantic Zooplankton. 1999. Leiden: Backhuys Publishers, 868 pp.
- 12. *Clarke K.R., Gorley R.N.* PRIMER v6: User Manual/Tutorial. 2006. Plymouth: PRIMER-E. 192 pp.
- 13. Cook A.J., Fox A.J., Vaughan D.G., Ferrigno J.G. Retreating Glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the

past half-century // Science. 2005. V. 308. P. 541–544. https://doi.org/10.1126/science.1104235

- Delgado L.E., Jana R., Mari V.H. Testing hypotheses on life-cycle models for Antarctic calanoid copepods, using qualitative, winter, zooplankton samples // Polar Biology. 1998. V. 20. No. 1. P. 74–76. https://doi.org/10.1007/s003000050278
- Deppeler S.L., Davidson A.T. Southern Ocean phytoplankton in a changing climate // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. 40. https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00040
- Fedotova A.A., Kashin S.V. Interannual variations of water mass properties in the central basin of the Bransfield Strait. In: Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (Eds.). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology // Advances in Polar Ecology. V. 6. 2021. Springer: Cham, Switzerland, P. 131–141.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_9.

- Fedotova A.A., Stepanova S.V. Water mass transformation in the Powell Basin. In: Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (Eds.). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology // Advances in Polar Ecology. V. 6. 2021. Springer: Cham, Switzerland, P. 115–129. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5 8.
- Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water exchange between deep basins of the Bransfield Strait // Water. 2022. V. 14. No. 20. 3193. https://doi.org/10.3390/w14203193
- Gao Q., Xu Z., Huang H. et al. Geographical distribution and age composition of Euphausia superba larvae (Crustacea: Euphausiacea) in the South Shetland Islands region and southern Scotia Sea in relation to environmental conditions // Acta Oceanol. Sin. 2013. V. 32. P. 59–67.
- Garcia M.D., Dutto M.S., Chazarreta C.J. et al. Microand mesozooplankton successions in the Antarctic coastal environment during a warm year // PlosONE, 2020. V. 15. No. 5. e0232614. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232614
- Hewes C.D., Reiss C.S., Holm-Hansen O.A. quantitative analysis of sources for summertime phytoplankton variability over 18 years in the South Shetland Islands (Antarctica) region // Deep-Sea Res. 2009. V. 56. P. 1230– 1241.
- 22. Heywood K.J., Garabato A.C.N., Stevens D.P., Muench R.D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C06021.

https://doi.org/10.1029/2003JC002053

- Hofmann E.E., Klinck J.M., Locarnini R.A., Fach B. Krill transport in the Scotia Sea and environs // Antarct. Sci. 1998. V. 10. P. 406–415. https://doi.org/10013/epic.21917.d001.
- 24. Johnston N.M.; Murphy E.J.; Atkinson A. et al. Status, change, and futures of zooplankton in the Southern Ocean // Front. Ecol. Evol. 2022. V. 9. 624692. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.624692
- Kasyan V.V. Age structure and spatial distribution of Euphausia superba larvae off the Antarctic Peninsula, Southern Ocean // Water. 2022. V. 14. 3196. https://doi.org/10.3390/w14203196
- 26. Kasyan V.V., Bitiutskii D.G., Mishin A.V. et al. Composition and distribution of plankton communities in the

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

Atlantic Sector of the Southern Ocean // Diversity. 2022. V. 14. No. 11. 923. https://doi.org/10.3390/d14110923

- 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. 2021. V. 496, No. 1. P. 92–95. https://doi.org/10.1134/S1028334X21010116
- 28. *Lee W., Kim S., Kang S.et al.* Distribution and abundance of zooplankton in the Bransfield Strait and the western Weddell Sea during austral summer // Ocean and Polar Research. 2004. V. 26. No. 4. P. 607–618. https://doi.org/10.4217/OPR.2004.26.4.607
- 29. Loeb V.J., Santora J.A. Population dynamics of Salpa thompsoni near the Antarctic Peninsula: growth rates and interannual variations in reproductive activity (1993–2009) // Progr. in Oceanog. 2012. V. 96. Iss. 1. P. 93–107.

https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.11.001

- Meredith M.P., King J.C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L19604. https://doi.org/10.1029/2005gl024042
- Meyer B., Atkinson A., Blume B., Bathmann U.V. Feeding and energy budgets of larval Antarctic krill Euphausia superba in summer // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2003. V. 57. P. 167–177.
- Mizdalski E. Weight and length data of zooplankton in theWeddell Sea in austral spring 1986 (ANT V/3) // Ber. Polarforsch. 1988. V. 55. P. 1–72.
- Moline M.A., Claustre H., Frazer T.K.et al. Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend // Global Change Biol. 2004. V. 10, P. 1973–1980. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00825.x
- 34. *Montes-Hugo M., Vernet M., Martinson D. et al.* Variability on phytoplankton size structure in the western Antarctic Peninsula (1997–2006) // Deep Sea Res. II. 2008. V. 55. P. 2106–2117. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.04.036
- 35. *Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A.* Antarctic Peninsula region of the Southern Ocean // Advances in Polar Ecology; Springer: Cham, Switzerland, 2021. V. 6. 433 p.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5.

- 36. Morozov E.G., Krechik V.A., Frey D.I. et al. Frontal zone between relatively warm and cold waters in the Northern Weddell Sea. In: Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (Eds.). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology // Advances in Polar Ecology. V. 6. 2021. Springer: Cham, Switzerland, P. 31–54. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5 3
- 37. Pakhomov E A., Pshenichnov L.K., Krot A. et al. Zooplankton distribution and community structure in the Pacific and Atlantic Sectors of the Southern Ocean during austral summer 2017–18: A pilot study conducted from Ukrainian long-liners // J. Mar. Sci. Eng. 2020. V. 8, 488. https://doi.org/10.3390/jmse8070488

Peck L.S., Barnes D.K. A., Cook A.J. et al. Negative feedback in the cold: ice retreat produces new carbon

sinks in Antarctica // Glob. Change Biol. 2010. V. 16.

P. 2614-2623.

https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02071.x

- 39. Pinkerton M.H., Decima M., Kitchener J.A. et al. Zooplankton in the Southern Ocean from the continuous plankton recorder: distributions and long-term change // Deep Sea Res. I. 2020. V. 162. 103303. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103303
- Razouls C., de Bovee F., Kouwenberg J., Desreumaux N. Diversity and geographic distribution of marine planktonic copepods. Sorbonne University, CNRS. 2005-2021. Available at http://copepodes.obs-banyuls.fr/en/ (accessed February 2022).
- Ross R.M., Quetin L.B., Kirsch E. Effect of temperature on developmental times and survival of early larval stages of *Euphausia superba* Dana // J. Exp. Mar. Bio. Ecol. 1988. V. 121. P. 55–71.
- Sangra P., Gordo C., Hernandez-Arencibia M. et al. The Bransfield Current system // Deep Sea Res. I. 2011. V. 58. P. 390–402.

https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011

- Schmidt K., Atkinson A., Venables H.J., Pond D.W. Early spawning of Antarctic krill in the Scotia Sea is fuelled by "superfluous" feeding on non-ice associated phytoplankton blooms // Deep Sea Res. II. 2012. V. 59–60. P. 159–172.
- Siegel V., Watkins J.L. Distribution, biomass and demography of Antarctic krill, *Euphausia superba* // Advances in Polar Ecology. Biology and ecology of Antarctic krill. 2016. V. 1. P. 21–100.
- 45. Spiridonov V.A. Spatial and temporal variability in reproductive timing of Antarctic krill (*Euphausia superba*) // Polar Biol. 1995. V. 15. P. 161–174. https://doi.org/10.1007/BF00239056
- 46. *Stammerjohn S.E., Martinson D.G., Smith R.C. et al.* Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Nino – Southern Oscillation

and Southern Annular Mode variability // J. Geophys. Res Oceans. 2008. V. 113. C03S90.

- 47. *Tarling G.A., Peck V., Ward P. et al.* Effects of acute ocean acidification on spatially-diverse polar pelagic foodwebs: insights from on-deck microcosms // Deep Sea Res. II. 2016. V. 127. P. 75–92.
- 48. *Thompson A.F., Heywood K.J., Thorpe S.E. et al.* Surface circulation at the tip of the Antarctic Peninsula from drifters // J. Phys. Oceanog. 2009. V. 39. P. 3–26.
- 49. *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 Pol. Res. 1987. V. 8. P. 333–366.
- 50. Trifoglio N.L., Olguin Salinas H.F., Franzosi C.A., Alder V.A. Annual cycle of phytoplankton, protozoa and diatom species from Scotia Bay (South Orkney Islands, Antarctica): community structure prior to, during and after an anomalously low sea ice year // Progress in Oceanography. 2022. V. 204. 102807. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102807
- Voronina N.M. Comparative abundance and distribution of major filter-feeders in the Antarctic pelagic zone // J. of Mar. Sys. 1998. V. 17. Iss. 1–4. P. 375–390. https://doi.org/10.1016/S0924-7963(98)00050-5
- 52. *WoRMS Editorial Board*. World Register of Marine Species. 2015. http://www.marinespecies.org.
- 53. Yakovenko V.A., Spiridonov V.A., Gorbatenko K.M. et al. Macro- and mesozooplankton in the Powell Basin (Antarctica): species composition and distribution of abundance and biomass in February 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer: Cham, Switzerland, 2021; V. 6. P. 131–141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5 27.
- 54. *Zhou X.Q., Zhu G.P., Hu S.* Influence of tides on mass transport in the Bransfield Strait and the adjacent areas // Antarctic Polar Sci. 2020. V. 23. 100506. https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100506

Structure and Spatial Distribution of Mesozooplankton Communities in the Atlantic Sector of the Southern Ocean

V. V. Kasyan[#]

A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (NSCMB FEB RAS), Vladivostok, Russia [#]e-mail: valentina-k@yandex.ru

In this paper, the composition and patterns of spatial distribution of mesozooplankton communities in the waters of the Bransfield Strait, the Antarctic Sound, the Powell Basin of the Weddell Sea and the waters off the Antarctic Peninsula and South Orkney Islands during the austral summer of 2022 are presented. Among the mesozooplankton communities two groups were found to be the most abundant: copepods *Calanoides acutus, Metridia gerlachei* and *Oithona* spp., and euphausiids *Euphausia superba*. The maximum abundance and biomass of the mesozooplankton were found in the warm Antarctic surface deep-sea water off the South Orkney Islands. The minimum values, respectively, were found in the cold modified Weddell Sea waters off the Antarctic Peninsula. Copepods was concentrated in the Bransfield Strait near the South Shetland Islands with sea surface temperature (SST) of $-0.5-0.5^{\circ}$ C and sea surface salinity (SSS) of $34.5-34.6\%_{0}$; and the krill *E. superba* eggs and larvae at different development stages was concentrated in the waters off the South Orkney Islands with SST values of $1-2^{\circ}$ C and SSS values of $34.3-34.5\%_{0}$. Four groups of mesozooplankton communities at different composition, abundance, and taxa dominance were identified. The results of this and future study have practical implications for monitoring the state of the changing ecosystem of the Southern Ocean.

Keywords: Mesozooplankton, copepods, krill Euphausia superba, Atlantic sector, Southern Ocean

УДК 639.28(269.4)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАКРО-И МЕЗОЗООПЛАНКТОНА В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛДА В ЯНВАРЕ 2020 г.

© 2023 г. К. М. Горбатенко¹, В. А. Яковенко^{2, *}

¹Тихоокеанский филиал ФГБНУ ВНИРО (ТИНРО), Владивосток, Россия ²Институт Биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия *e-mail: yakovenko_vla@mail.ru Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г. Принята к публикации 12.09.2022 г.

Исследовано пространственное распределение биомассы видов макро- и мезозоопанктона, а также размерная и половая структура криля *Euphausia superba* и сальп *Salpa thompsoni* и *Ihlea racovitzai* в проливе Брансфилда в течение антарктического лета 2020 г. Пробы зоопланктона отбирались сетью Бонго. На всех исследованных станциях основу биомассы зоопланктона составляли сальпы *S. thompsoni* и *I. racovitzai*, а третье место занимали *E. superba*, их биомасса составляла от 6.3 до 96.3 мг/м³, причем криль встречался лишь в Северо-Западной глубоководной части пролива, куда он проникал из моря Беллинсгаузена. Это объясняется пищевой конкуренцией между сальпами и крилем. Биомасса других видов зоопланктона во всех районах пролива была незначительной по сравнению с сальпами и крилем и распределялась равномерно. При сравнении полученных в экспедиции данных с данными 90-х и 2000-х годов, прослеживается явный тренд увеличения биомассы *E. superba*, что может быть связано с увеличением температуры воды Антарктической акватории. На примере пролива Брансфилда четко видна отрицательная корреляция между биомассой сальп и криля.

Ключевые слова: криль, сальпы, зоопланктон, пролив Брансфилда, биомасса **DOI:** 10.31857/S0030157423040044, **EDN:** YKDRPI

введение

Со второй половины XX века криль, ракообразные отряда Euphausiacea, стал одним из основных биоресурсов, добываемых в морях Антарктиды. Биомасса эвфаузиид в проливе Брансфилда традиционно была одной из наибольших в Антарктике наряду с периферией моря Уэдделла, морем Скотия и водами к северо-западу от Антарктического полуострова и над шельфом о. Южного Георгия [8]. Мюррей в 90-х годах на основании акустических исследований рассчитал, что величина биомассы криля в бассейнах Антарктики варьировала от 17 до 160 г/м², с наибольшими величинами именно в проливе Брансфилда [22].

Одновременно в последние десятилетия фиксировалось стабильное увеличение биомассы сальп *Salpa thompsoni* Foxton, 1961 в районе Антарктического полуострова, особенно в проливе Брансфилда и вблизи острова Элефант [19, 23]. Сальпы обладают способностью к интенсивному размножению, превосходя в этом другие виды зоопланктона, и при этом существенно влияют на биомассу других компонентов планктонных сообществ и трансформируют потоки энергии в антарктических пелагических пищевых цепях [17, 18]. Так, например, Нишикавой был зафиксирован существенный размах значений биомассы криля в разных участках пролива (от 0 до 151.4 мг См⁻²), данная разница была обусловлена выеданием сальпами криля, между численностью сальп и криля отмечена достоверная отрицательная корреляция [23]. В других исследованиях в разных частях Антарктического региона [19, 20, 23, 28] изучали взаимодействие между крилем (Euphausia superba Dana, 1850) и сальпами (S. thompsoni, Ihlea racovitzai (Van Beneden and Selvs Longchamp, 1913)). которые являются основными видами в пищевых сетях вод Антарктики. В результате была установлена некоторая негативная связь между ними.

Гидрологические факторы также влияют на пространственное распределение вышеуказанных видов [2, 15, 30], при этом влияние определенных водных масс нараспределение количественных показателей криля в проливе Брансфилда иногда оказывается наиболее весомым [10]. Однако, несмотря на то, что имеется довольно



Рис. 1. Схема станций в проливе Брансфилд.

много исследований влияния океанографических факторов на распределение мезо- и макрозоопланктона в проливе Брансфилда [10, 16, 31], все же, к настоящему времени не сформировалось достаточного понимания закономерностей их влияния на распределение популяции криля и всего зоопланктона в проливе, что определяет необходимость продолжения многолетних исследований.

Целью данного исследования было изучение пространственной вариабельности структуры и количественных показателей зоопланктона в проливе Брансфилд в январе (антарктическое лето) 2020 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований

Пролив Брансфилда лежит между Антарктическим полуостровом и Южными Шетландскими островами, от острова Кинг-Джордж на северовостоке пролива до острова Анверс на юго-западе, длина пролива составляет 112 км при максимальной глубине 2 км. Океанографические особенности пролива обусловлены его расположением между морем Беллинсгаузена на западе и морем Уэдделла на востоке [31, 32]. В летний период акватория пролива заполнена двумя главными водными массами, впадающими из этих морей, что определяет высокую изменчивость гидрофизических показателей во временном и пространственном аспектах. Течения из моря Беллинсгаузена несут северные воды, относительно теплые и пресные по сравнению с течениями моря Уэдделла, которые формируют южные водные массы в проливе [11].

Методы

Исследования в проливе Брансфилда проводили в январе 2020 года на разрезе в центральной части на 2-м этапе 79-й экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш".

Пробы макропланктона были отобраны сетью Бонго (диаметр входного отверстия 60 см, ячея 500 мкм). Сеть была оснащена muhuCTD-зондом и датчиком пройденного пути. Облов проводился при правой циркуляции судна (радиус циркуляции – 1.1 кабельтов) на скорости 2 узла до расчетной глубины 200 м. Необходимую длину вытравленного троса (L) определяли по формуле: $L = 200/\cos a$, где а – угол отклонения троса от вертикали. Скорость подъема сети составляла 1 м/с.

Отобранные пробы фиксировали 6% формалином. Биологический анализ проб криля включал определение количества экземпляров в пробе, их индивидуальной длины и массы, пола и стадии зрелости (степени развития внешних и внутренних гениталий). Измерение длины рачков производили с точностью до 1 мм от внешнего края глазной орбиты до конца тельсона. Индивидуальная масса криля определялась взвешиванием рачка, подсушенного фильтровальной бумагой, на торсионных весах (WT-1000). Если улов составлял



Рис. 2. Схема течений в проливе Брансфилда.



Рис. 3. Соотношение биомассы сальп, эфваузиид и видов мезозоопланктона в проливе Брансфилда в январе 2020 г. 1 – глубоководная часть, 2 – материковый склон, 3 – шельф.

менее 200 особей, он весь подвергался анализу. В случае больших уловов выборка составляла не менее 200 особей, кроме того, еще 100 рачков промеряли и взвешивали для уточнения размерно-весового состава. Стадии зрелости криля определяли по шкале, разработанной Р.Р. Макаровым [21]. Работы по мониторингу уловов и биологии криля выполнялись по единым методикам [3, 29].

Также производилось видовая идентификация и измерение размеров и массы сальп.

Степень доминирования видов зоопланктона рассчитывалась с помощью индекса ценотической значимости (ИЦЗ) по формуле

$$I = p \sqrt{b},$$

где p – встречаемость вида, %, b – средняя биомасса вида, г/м³ [5].

Параллельно со сбором зоопланктона проводились измерения абиотических параметров – температуры, солености, концентрации кислорода и направления течений. Средние значения и

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

коэффициенты корреляции рассчитывали в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно гидрологическим данным, общая схема течений в проливе Брансфилда соответствовала ранее полученным данным [1, 6] (рис. 2).

Наибольшие величины биомассы криля и сальп были характерны для северо-западной глубоководной области, а в юго-западной шельфовой области были отмечены лишь сальпы. В центральной зоне — зоне свала глубин — криль отсутствовал, из эвфаузиид наблюдались виды *Thysanoessa macrura* G.O. Sars, 1883 и *T. vicina* Hansen, 1911. Повсеместно основу зоопланктона составляли сальпы *S. thompsoni* и *I. racovitzai*, доля которых по биомассе в данных районах колебалась от 96.6 до 99.6% (рис. 3), при этом их биомасса была минимальной в центральной части пролива.

Особи *Euphausia superba* были отмечены только в глубоководном северо-западном районе пролива Брансфилда (станции 6587—6591), где вели-



Рис. 4. Биомасса *Е. superba* на исследованных станциях пролива Брансфилда.

чина их биомассы колебалась от 6.3 до 96.3 Mr/M^3 (рис. 4).

В центральной части района, в области свала глубин, количество эвфаузиид понизилось более чем на порядок (средняя биомасса 1.92 мг/м³), за счет отсутствия в пробах *E. superba*. В южной части исследованного района не были обнаружены не только *E. superba*, но и другие виды эвфаузиид.

Общая биомасса сальп варьировала от 68.2 мг/M^3 в области свала глубин до 3087.9 мг/M^3 в северной глубоководной части района исследований. Повсеместно доминировал вид *S. thompsoni*, представленный особями размером от 5 до 120 мм (табл. 1). В северной глубоководной зоне, где биомасса *S. thompsoni* была наибольшей, преобладали относительно мелкие особи размером 40-50 мм. В области свала глубин при средней величине биомассы 67.2 мг/M^3 модальная группа была представлена особями с размерами 40-60 мм. В южной шельфовой зоне доминировали крупные особи длиной 60-70 мм (табл. 1).

Сальпы *I. racovitzai* имели размеры от 10 до 20 мм и концентрировались, в основном, в южном шельфовом районе, где их средняя биомасса составляла всего 12.8 мг/м³.

Как общая биомасса сальп и криля, так и биомасса их отдельных видов, не показала достоверной корреляции с температурой и соленостью. Сравнение измеренной нами биомассы криля с данными, полученными в этом районе предыдущими исследователями, демонстрирует ее снижение [8, 24, 27].

В период исследования преобладали ветра западных румбов, что вызвало занос крупноразмерных особей криля из моря Беллинсгаузена. Согласно литературным данным [9, 13, 16, 25, 26], именно в подрайоне 48.1 (пролив Брансфилда) наиболее крупные особи *Е. Superba* перемещаются летом вдоль шельфового склона Антарктического полуострова в восточном направлениис водами Антарктического циркумполярного течения.

Распределение видов мезозоопланктона между исследованными районами оказалось равномерным. Копеподы повсеместно имели низкую биомассу — от 0.07 до 0.19 мг/м³, а их доля в общей биомассе зоопланктона составила от 0.01 до 0.1% (табл. 1).

Среди 6 видов копепод, которые были нами встречены, преобладали Rhincalanus gigas Brady. 1883 и Metridia gerlachei Giesbrecht, 1902. Среди гипериид доминировал вид Hyperia medusarum, их общая биомасса была незначительна (0.08-0.93 мг/м³). Сагитты были представлены 2 видами: Pseudosagitta maxima (Conant, 1896) и Eukrohnia hamata (Mobius, 1875) и имели минимальные суммарные биомассы. 3 вида птеропод, обнаруженных в пробах – Clio pyramidata Linnaeus, 1767, Spongiobranchaea australis d'Orbigny, 1836 и Limacina helicina (Phipps, 1774), формировали низкую суммарную биомассу – до 0.41 мг/м³. Среди других представителей зоопланктона были обнаружены мизилы. пелагические личинки полихет. сифонофоры и личинки рыб. основные концентрации которых были сосредоточены в южном мелководном районе.

В целом, в исследуемом районе, зоопланктон был представлен 11 таксономическими группами и 27 видами: Euphausiacea (3 вида), Salpidae (2 вида), Calanidae (7 видов), Hyperiidae (5 видов), Sagittidae (2 вида), Cliidae (3 вида), прочие (5 видов).

ОБСУЖДЕНИЕ

В структуре зоопланктоценоза по индексу ИЦЗ, доминировали 2 вида сальп — *S. thompsoni* и *I. racovitzai*.

Вид S. thompsoni был явным доминантом, индекс ценотической значимости вида составил 238.4, тогда как ИЦЗ вида I. racovitzai составил лишь 7.83. ИЦЗ E. superba был сопоставим с таковым сальпы I. racovitzai. ИЦЗ другого вида эвфаузиид Thysanoessa macrura (4,85) оказался также сравним и немного ниже такового E. superba за счет встречаемости T. macrura на большем количестве станций. Другие виды, ранжированные по индексу ИЦЗ, имели незначительный вес в видовой структуре зоопланктона. Популяция вида E. superba в проливе Брансфилда была представлена особями размером от 10 до 55 мм. Молодь (от 10 до 35 мм) составила 31.5% общей численности популяции (рис. 6).

Половозрелые особи в размерном диапазоне от 35 до 55 мм формировали 68.5%. Среди половозрелых особей криля, 36.5% составили самки, а 63.5% — самцы. Длина самок изменялась от 37 до 50 мм, в среднем 42 ± 3.9 мм, самцов — от 33 до 54, в среднем 44.8 ± 5.5 мм. Длина молоди криля варьировала в пределах от 20 до 30 мм, в среднем 25.9 ± 3.0 мм. Таким образом, среди взрослых особей криля установлено преобладание размерной группы 42-45 мм.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Район		пр. Брансфилда (северная часть)	пр. Брансфилда (центральная часть)	пр. Брансфилда (южная часть)			
Биотоп	[Глубоководная часть	Материковый склон	Шельф			
Глубина,	М	919	472	165			
Слой, м	[227	164	54			
	Размер, мм	Биомасса. мг/м ³					
Сумма		3133.86	70.62	2542.16			
Эвфаузиилы		44.52	1.92	_			
Eunhausia superha	15-20	0.03	_	_			
Euphausia superba	20.1-30	2.34	_	_			
Euphausia superba	30.1-40	5.32	_	_			
Euphausia superba	40.1-50	18.77	_	_			
Euphausia superba	50.1-55	14.74	_	_			
Thysanoessa macrura	<10	0.04	0.01	_			
Thysanoessa macrura	10.1-15	1.98	1.14	_			
Thysanoessa macrura Thysanoessa macrura	15-20	1.22	0.74	_			
Thysanoessa macrura	20-25	0.05	_	_			
Thysanoessa vicina	10.1 - 15	0.04	0.03	_			
Сальны	10.1 15	3087 89	68 21	2540 85			
Salna thompsoni	5-120	3087.89	67.32	2528.07			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	51-10	10.80	0.89	15 32			
Salpa thompsoni	10.1-20	31.79	1 13	146.40			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	20.1 - 30	136.78	1.13	256.22			
Salpa thompsoni	20.1 50 30.1-40	472 37	7.04	230.22			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	40 1-50	934.88	7.04	64 70			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	40.1-50 50.1-60	764 34	23.37	300.52			
Salpa thompsoni	50.1 00 60.1-70	320.47	4 95	1235.48			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	70.1-70	239.34	5 73	270.87			
Salpa thompsoni Salpa thompsoni	80.1-100	140.35	5.75	270.07			
Salpa thompsoni	>100	36.77	_	_			
Ihlea racovitzai	10 <u>-</u> 20	0.00	0.89	12 78			
Копералы	10-20	0.00	0.07	0.11			
Rhincalanus gigas	36-55	0.1	0.01	0.06			
Calanoidas acutus	2 5 - 3 8	0.01	0.01	0.00			
Calanus propinguus	2.5-3.8	0.01	0.01	0.02			
Calanus simillimus	2 5 - 3 0	0:01	0.04	0.05			
Matridia garlachai	2.5 - 5.0	0.05	0.01	_			
Parauchaata antarctica	2.4-4.0	0.03		_			
Parouchaeta sp	4.0 4.5	0.02		_			
Turenchueld sp.	4.0-4.5	0.68	0.08	0.03			
Themisto gaudichaudii	21.5	0.02	0.00	0.95			
Primno macrona	2.1-3	0.02	0.01	0.01			
1 нино тастора Реімно таскора	2.5-5	0.01	_	0.01			
1 піпно тастора Ргімпо тастора	3.1 - 10	0.16	_	_			
Cullonus magallanious	10.1-13.0 <u>8</u> 10	0.10	_				
Cynopus magenanicus	0-10	0.02	_	I —			

Таблица 1. Биомасса (мг/м³) сетного зоопланктона в проливе Брансфилда летом 2020г. Облавливаемый слой – от 0 м до 227 м
ГОРБАТЕНКО, ЯКОВЕНКО

Таблица 1. Окончание

Район		пр. Брансфилда (северная часть)	пр. Брансфилда (центральная часть)	пр. Брансфилда (южная часть)	
Cyllopus magellanicus	10.1–14	0.10	0.07	_	
Hyperia medusarum	10-15	0.19	0.00	0.92	
Scina antarctica	5-10	0.19	—	—	
Хетогнаты		0.03	—	0.03	
Pseudosagitta maxima	10-15	—	—	0.02	
Eukrohnia hamata	10-15	0.03	—	0.01	
Птероподы		0.41	0.31	—	
Clio pyramidata	>10	0.41	0.17	—	
Spongiobranchea austalis	2—4	—	0.02	—	
Spongiobranchea austalis	4.1-6	—	0.04	—	
Limacina helicina	2.1-6	—	0.01	—	
Limacina helicina	6.1–10	—	0.08	—	
Прочие		0.08	0.04	0.23	
Mysidacea	2-10	—	—	0.03	
Mysidacea	10.1-20	—	—	0.21	
Tomopteris pacifica	12-15	—	0.04	—	
Conchoecia sp.	2.6-3.0	0.01	—	—	
Dimophyes antarctica	3	0.01	—	—	
Dimophyes antarctica	4-8	0.02	—	—	
Dimophyes antarctica	8-10	0.03	—	—	
Larvae Pisces	2-10	0.01	_	_	



Рис. 5. Структура зоопланктоценоза пролива Брансфилда по ИЦЗ (индекс ценотической значимости).

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ



Рис. 6. Длина самок, самцов и молоди *E. superba* в проливе Брансфилд в январе 2020 г.



Рис. 7. Соотношение стадий зрелости самок и самцов криля в проливе Брансфилд в январе 2020 г.

В возрастной структуре *E. superba*, среди самок преобладали особи ранних стадий развития IIB и IIIA, — по 26.1% каждая (рис. 7). Доля преднерестовых особей рачков (четвертая стадия развития IIIC) составляла 21.7%. Среди самцов доминировали более поздние стадии развития —IIA2 и IIIA, формировавшие 27.5 и 32.5% от общей численности самцов соответственно.

Полученный материал демонстрирует, преобладание в возрастной структуре популяции *E. superba* половозрелых особей, причем среди самок — преобладали более ранние стадии по сравнению с самцами, среди которых больше было преднерестовых и нерестовых особей.

В соответствии с полученными значениями биомасс сальп, криля и мезозоопланктона, были выделены районы с разной структурой зоопланктона (рис. 8).

Одна из весомых причин уменьшения биомассы криля связана с тем, что сальпы, являясь пищевыми конкурентами криля, активно выедают фитопланктон, являющийся для них общей пищей, что не дает возможности растительноядным ракообразным формировть высокие концентрации в местах их скопления [4, 12, 14]. Необходимо отметить, что сальпы приурочены к верхнему 200-м слою воды [7], и наличие там их скоплений приводит к вытеснению криля, также обитающего в поверхностном слое водной толщи. В то же время, авторами не найдено достоверной корреляции между биомассами криля и сальп, что, вероятно, объясняется влиянием течений на их распределение в данном районе.

В целом, северо-западная область района исследований характеризовалась интенсивным развитием сальп и умеренным развитием криля, заносимого из моря Беллинсгаузена при преобладании ветров западных румбов. В более южных районах криль полностью отсутствовал, при этом в самом южном районе были встречены лишь сальпы.

649





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В северной глубоководной части пролива Брансфилда, биомасса зоопланктона составляла 3087.9 мг/м³, в центральной зоне материкового склона – 70.6 мг/м³, в шельфовой зоне – 2542.2 мг/м³. Повсеместно основу зоопланктона составляли сальпы (S. thompsoni, I. racovitzai), доля которых по биомассе в различных районах пролива Брансфилд варьировала от 96.6% до 99.6%. Криль (E. superba) встречался только в глубоководном районе пролива, где его средняя биомасса составляла от 6.3 до 96.3 мг/м³. Согласно индексу ИЦЗ, виды S. thompsoni и I. racovitzai преобладали в зоопланктоне, следующим по значению компонентом был криль *E. superba*, доля других видов была незначительной. Сравнение полученных нами данных побиомасссальп и криля с данными 1990-х и 2000-х годов, демонстрирует динамику возрастанияроли сальп в планктонных сообществах по отношению к E. superba, что определяется пищевой конкуренцией. Среди взрослых особей *E. superba* установлено преобладание размерной группы 42-45 мм, доля молоди составляла 31.5% общей численности вида. Биомасса мезозоопланктона во всех районах пролива распределялась равномерно и была относительно низкой. Не было выявлено достоверной корреляции между биомассойсальп и криля и биомассой отдельных видов зоопланктона с одной стороны, и температурой и соленостью – с другой. Отсутствие достоверной корреляции между биомассой криля

и сальп, вероятно, объясняется определяющим влиянием течений в данном районе на распределение этих компонентов пелагического сообщества. В период исследования преобладали ветра западных румбов, что и вызвало занос крупноразмерных особей криля из моря Беллинсгаузена.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках государственного задания ФИЦ Институт биологии южных морей РАН им. А.О. Ковалевского "Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики" (Номер гос. Регистрации АААА-А19-119100290162-0), темы государственного задания 0128-2019-0008 и договора о сотрудничестве между ИО РАН и ВНИРО.

Благодарности. Выражаем искреннюю признательность капитану Сазонову Л.В. и экипажу НИС "Академик Мстислав Келдыш" за помощь и слаженную работу в рейсе, к. ф.-м. н. Фрею Д.И. за предоставление данных по гидрологическим показателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артамонов Ю.В., Романов А.С., Внуков Ю.Л., Перов А.А., Степура И.И. Результаты океанографических исследований в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 г. // Украинский антарктический журнал, 2003. №1. С. 7–16.
- 2. Жук Н.Н., Корзун Ю.В. Размерный состав антарктического криля *Euphausia superb* (Euphausiacea, Euphausiidae) и гидрометеорологические факторы

в проливе Брансфилд (подрайон 48,1 антарктический полуостров) в сезоны 2014—2017 гг. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2018. С. 28–38.

- Методические указания по сбору и первичной обработке в полевых условиях по биологии и распределению криля. М.: ВНИРО. 1982, 48 с.
- Минкина Н.И., Самышев Э.З. Энергетический метаболизм антарктической сальпы (Salpa thompsoni Foxton) в гетерогенном океанографическом поле // Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечение деятельности национальных экспедиций: материалы I Межд. научн.-практ. конф. (26–29 мая 2014 г., к.п. Нарочь, Беларусь). Минск: Экоперспектива, 2014. С. 159–164.
- 5. *Мордухай-Болтовской Ф.Д.* Методика изучения биоценозов внутренних водоемов. Москва : Наука, 1975. 240 с.
- 6. *Морозов Е. Г.* Течения в проливе Брансфилд // Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. Вып. 6. С. 823–825.
- Пахомов Е.А. Вертикальное распределение и суточные миграции Антарктического макропланктона. В кн.: Воронина Н. М. (ред.) Пелагические экосистемы Южного океана. М.: Наука, 1993. С. 146–150.
- Самышев Э.З. Антарктический криль и структура планктонного сообщества в его ареале. М.: Наука, 1991. 168 с.
- Спиридонов В.А. Исследования возрастной структуры популяции Euphausia superba Dana на примере района Антарктического полуострова и сопредельных вод // Биологические ресурсы Арктики и Антарктики. М.: Наука, 1987. С. 391–414.
- Catalan I.A., Morales-Nin B., Company J.B. et al. Environmental influences on zooplankton and micronekton distribution in the Bransfield Strait and adjacent waters // Polar Biology. 2008. V. 31. No. 6. P. 691–707. https://doi.org/10.1007/s00300-008-0408-1
- Garcia M.A., Castro C.G., Rfos A.F. et al. Water masses and distribution of physicochemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96 // Deep-sea Research II. 2002. V. 49. P. 585–602. doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8
- Dubischar C., Bathmann U.V. Grazing impact of copepods and salps on phytoplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean // Deep-sea Research II. 1997. V. 44. P. 415–433. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(96)00064-1
- Hofmann E.E., Klinck J.M., Locarninii R.A. et al. Krill transport in the Scotia Sea and environs // Antarctic Science.1998. V. 10. No 4. P. 406–415. https://doi.org/10.1017/S0954102098000492
- Huntley M.E., Sykes P.F., Marin V. Biometry and trophodynamics of Salpathompsoni Foxton (Tunicata: Thaliacea) near the Antarctic Peninsula in austral summer, 1983-1984 // Polar Biology. 1989. Vol. 10. P. 59–70. https://doi.org/10.1007/BF00238291
- 15. *Hernandez-Leon S, Torres S, Gomez M.et al.* Biomass and metabolism of zooplankton in the Bransfield Strait (Antarctic Peninsula) during austral spring // Polar Bi-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

ology. 1999. V. 21. No 4. P. 214–219. https://doi.org/10.1007/s003000050355

- Ichii T., Naganobu M. Surface water circulation in krill fishing areas near the South Shetland Islands // CCAMLR Science. 1996. V. 3. P. 125–136.
- Loeb V, Siegel V, Holm-Hansen O.et al. Effects of seaice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web // Nature. 1997. V. 387. P. 897–900. https://doi.org/10.1038/43174
- Pakhomov E.A., Dubischar C.D., Hunt B.P.V. et al. Biology and life cycles of pelagic tunicates in the Lazarev Sea, Southern Ocean // Deep-sea Research II. 2011. V. 58. P. 1677–1689. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.11.014
- Pakhomov E.A., Froneman P.W., Perissinotto R. Salp/ krill interactions in the Southern Ocean: spatial segregation and implications for the carbon flux // Deep-sea Research II. 2002. V. 49. P. 1881–1907. https://doi.org/10.1155/2010/410129
- Piatkowski U. Macroplankton communities in Antarctic surface waters: spatial changes related to hydrography.//Marine Ecology Progress Series. 1989. V. 55. P. 251–259.
 - https://doi.org/10.3354/meps055251
- Makarov R.R., Denys C.J. Stages of sexual maturity of Euphausiasuperba Dana // BIOMASS Handbook. 1980. Iss. no 11. 11 p.
- Murray A.W.A., Watkins J.L., Bone D.G. A biological acoustic survey in the marginal iceedge zone of the Bellingshausen Sea // Deep-sea Research II. 1995. V. 42. P. 1159–1175. doi.org/1021016/0967-0645(95)00059-Y
- Nishikawa J., Naganobu M., Ichii T. et al. Distribution of salps near the South Shetland Islands during austral summer, 1990-1991 with special reference to krill distribution // PolarBiology. 1995. V. 15, pp. P. 31–39. https://doi.org/10.1007/BF00236121
- Santora J.A., Reiss C.S., Loeb V.J., Veit R.R. Spatial association between hotspots of baleen whales and demographic patterns of Antarctic krill *Euphausiasuperba* suggests size-dependentpredation // Marine Ecology Progress Series. 2010. V. 405. P. 255–269. https://doi.org/10.3354/meps08513
- Siegel V.A.Concept of seasonal variation of krill (*Euphausia superba*) distribution and abundance west of the Antarctic Peninsula. In: *Antarctic ocean and resources variability*. D. Sahrhage (Ed.), 1988. P. 219–230. doi.org/10.1007/978-3-642-73724-4 19
- Siegel V. Biology and ecology of Antarctic krill // Advances in Polar Ecology. 2016. 458 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29279-3
- Siegel V. Distribution and population dynamics of Euphausia superba: summary of recent findings // Polar Biololy. 2005. V. 29. P. 1–22. https://doi.org/10.10077s00300-005-0058-5
- Siegel V., Harm U. The composition, abundance, biomass and diversity of the epipelagic zooplankton communities of the southern Bellingshausen Sea (Antarctic) with special reference to krill and salps // Archive of fishery and marine research. 1996. V. 44. P. 115–139.

- 29. Standard measurements for krill, fish, crabs and squid in: Scientific Observers Manual: CCAMLR, 2006, pp. 33–45.
- 30. Vazquez E., Ameneiro J., Putzeys S. et al. Distribution of meroplankton communities in the Bransfield Strait. Antarctica // Marine Ecology Progress Series. 2007. V. 338. P. 119-129.

https://doi.org/10.3354/meps338119

- 31. Zhou M., Niiler P.P., Hu J-H. Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica // Deepsea Research I. 2002. V. 49. P. 267-280. https://doi.org/10.1016/s0967-0637(01)00062-0
- 32. Zhou M., Niiler P.P., Zhu Y., Dorland R.D. The western boundary current in the Bransfield Strait. Antarctica // Deep-sea Research I. 2006. V. 53. P. 1244-1252. https://doi.org/1021016/j.dsr.20062042003

Spatial Variability of Macro- and Mesozooplankton in the Bransfield Strait in January 2020

K. M. Gorbatenko^a, V. A. Yakovenko^{b, #}

^aPacific branch of VNIRO (TINRO) of RAS, Vladivostok, Russian Federation ^bA. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation *[#]e-mail: vakovenko vla@mail.ru*

The spatial distribution of the biomass of macro- and mesozoopankton species, as well as the size and sex structure of the species Euphausiasuperba (krill), Salpathompsoni, and Ihlearacovitzai in Bransfield Strait during the Antarctic summer of 2020 were studied. Krill is at the heart of the food chain of the Antarctic ecosystem because numerous populations of seabirds, seals and whales feed on krill. In recent decades, the Antarctic ecosystem has been under significant changes caused by global warming, but the nature and extent of this impact on krill stocks, especially its juveniles in the Bransfield Strait, remains insufficiently studied. In recent decades, the Antarctic ecosystem has been experiencing significant changes associated with global warming, but the nature and extent of this impact on krill stocks, especially its juveniles in the Bransfield Strait, remains insufficiently studied. At the same time, this particular region is a highly productive zone of the Antarctic ecosystem and one of the areas where concentrations of Antarctic krill accumulate. The aim of this study was to study the spatial variability of the structure, numbers and biomass of zooplankton in the Bransfield Strait during the Antarctic summer of 2020. Zooplankton samples in Bransfield Strait were collected with Bongo net in January 2020. The samples were processed on the research vessel in the intervals between sampling according to the standard procedure. At all stations studied, the main zooplankton biomass was by salps (S. thompsoni and I. racovitzai). According to the index of coenotic significance, salps were of primary importance in the zooplanktocenosis, in which E. superba occupied the third place with biomass ranged from 6.3 to 96.3 mg/m³, and krill was meet only in the northwestern deep-water part of the Bransfield Strait. This is due to food competition between salps (S. thompsoni, I. racovitzai) and krill. The presence of krill in the deep-water part of the Bransfield Strait is explained by its introduction from the Bellingshausen Sea due to the prevalence of western winds. The biomass of other zooplankton species in all areas of the strait happened very small in comparison with that of salps and krill and was distributed uniformly. When comparing the ratio of the biomass of the above species obtained during the expedition with the data of the 90s and 2000s, there is a clear trend of an increase in salps and a decrease in *E. superba*, that is probably associated with the general trend of an increase in water temperature in the Antarctic waters. Thus, the example of Bransfield Strait clearly shows a negative correlation between the biomass of salps and krill.

Keywords: krill, salpa, zooplankton, the Bransfield Strait, biomass

——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 595.383.1:591.36:556.013

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СВЯЗИ С АБИОТИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ СРЕДЫ МОЛОДИ И ПОЛОВОЗРЕЛОГО АНТАРКТИЧЕСКОГО КРИЛЯ *EUPHAUSIA SUPERBA* НА ОСНОВАНИИ ФАКТИЧЕСКИХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2023 г. С. А. Мурзина^{1, 3, *}, В. П. Воронин¹, Д. Г. Битютский^{1, 2}, А. М. Орлов^{3, 4}

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия ²Азово-Черноморский филиал ФГБНУ "ВНИРО" ("АзНИИРХ"), Керчь, Россия ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ⁴Томский государственный университет, Томск, Россия *e-mail: murzina.svetlana@gmail.com Поступила в редакцию 01.12.2022 г. После доработки 12.12.2022 г. Принята к публикации 16.12.2022 г.

Обсуждаются результаты статистической обработки встречаемости особей антарктического криля *Euphausia superba* в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, проливах Брансфилда и Антарктик и на полигоне к востоку от Южных Оркнейских о-вов летом южного полушария 2022 г. Проведено моделирование особенностей распределения молоди и половозрелых рачков в зависимости от некоторых факторов среды, основанное на данных гидрофизических измерений. Получены данные о значениях основных абиотических факторов среды, оптимальных для жизнедеятельности ювенильных и половозрелых особей криля, а также оказывающих влияние на его распределение в обследованном регионе. Результаты модельных расчетов имеют значение для мониторинга состояния экосистем Антарктики и их компонентов в условиях изменяющихся факторов среды, включая изменения климата.

Ключевые слова: антарктический криль *Euphausia superba*, экологические факторы, моделирование, распределение, Атлантический сектор Антарктики

DOI: 10.31857/S0030157423040159, EDN: YIGIRC

введение

Антарктический криль *Euphausia superba* Dana, 1852 является одним из наиболее экологически значимых представителей отряда Euphausiacea и незаменимым структурообразующим компонентом морских экосистем Антарктики. В Южном океане он является важнейшим объектом питания рыб (в том числе промысловых), околоводных птиц и морских млекопитающих [22]. В последнее время активно обсуждается принципиальная роль эвфаузиид, особенно антарктического криля, а также других представителей мезопелагического нектона в поддержании баланса круговорота вешества и энергии в условиях изменения климата [10, 15, 21]. Экологическая роль криля состоит и в его участии в процессах перемещения органического вещества от высокопродуктивной эпипелагиали к батипелагиали [10, 20, 21]. Одной из биологических особенностей антарктического криля является его способность к линьке в течение всей жизни, которая имеет регулярный характер

(в среднем каждые 2 недели) и зависит от температуры воды и сезона [9]. Тем самым криль участвует в круговороте углерода в Антарктике: перелинявший хитиновый экзоскелет — экзувий содержит до 23% углерода от сухой массы. Он эффективно ре-минерализуется и является дополнительным источником растворенного органического углерода, особенно в местах массового скопления криля [14, 20]. Кроме того, антарктический криль включен в биогеохимические циклы кальция, фтора и железа, которые появляются в воде также в составе экзувиев во время линьки и с фекальными пеллетами, соответственно [10].

Известно, что антарктический криль характеризуется неравномерным распределением в толще воды и наличием суточных вертикальных миграций. Диапазон глубин, которые способен осваивать криль, варьирует от 0 до 2000 и даже до 3000 м [26]. Преимущественно он концентрируется в водной толще на глубинах от 0 до 200–500 м. При этом обнаружено, что в летнее время от 2 до 20% скоплений регистрируются в диапазоне 200-2000 м [21]. В проливе Брансфилда антарктический криль преимущественно встречается на глубинах от поверхности до 300 м [12, 16]. В одном из исследований экологии криля [11] с использованием автономного подводного аппарата обнаружены особи, встречавшиеся на глубине 3500 м. В придонных горизонтах криль находит дополнительный источник питания – фитодетрит, с помощью которого животное компенсирует недостаток пищи в зимний период [12, 25]. Пространственная разобщенность разных возрастных групп криля позволяет снизить внутривидовую пищевую конкуренцию, минимизировать каннибализм и обеспечить устойчивое существование и поддержание численности популяции в различные по уровню пополнения периоды [23].

Являясь стенотермным видом, антарктический криль обитает в узком диапазоне температур – от -1.8 до +5°C [24]. При этом оптимальные температуры у разновозрастного криля различаются – особи в возрасте 0+ населяют поверхностные воды, а более старшие животные (возраст 1+) уже способны к вертикальным миграциям [27]. На всех стадиях развития криля в его распределении наблюдается четкая пространственная дифференциация с определенным сочетанием экологических факторов в зависимости от физиологических потребностей особей. Его онтогенез и жизненный цикл отличается многостадийностью и комплексностью. Процессы нереста, успешного и полноценного раннего онтогенеза, дальнейшая выживаемость и распределение личинок, молоди и половозрелых особей криля находятся в тесной взаимосвязи с изменяющимися факторами среды (температура, соленость, сила и направление течений, трофика и др.).

В настоящей работе обсуждаются результаты статистической обработки встречаемости особей криля на исследованных станциях в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, проливах Брансфилда и Антарктик и на полигоне к востоку от Южных Оркнейских о-вов летом южного полушария 2022 г. В ней также проведено моделирование особенностей распределения молоди и половозрелого антарктического криля *Euphausia superba* в зависимости от некоторых факторов среды, основанное на фактических данных гидрофизических измерений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" (АМК-87, 19.01—14.02.2022 г.) в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, проливах Брансфилда и Антарктик, а также к востоку от Южных Оркнейских о-вов с помощью двойной квадратной сети (double square net, DSN) и разноглубинного трала Айзекса-Кидда в модификации Самышева-Асеева (РТАКСА) отобрано более 1000 экз. антарктического криля. Из каждого улова отбирали пробу в 300 экз. и подвергали ее биологическому анализу (определение размера, половой принадлежности, а также стадии зрелости взрослых особей, цвета печени, свидетельствующей об активности питания криля, степени наполнения желудка и кишечника, массы тела с точностью до 10 мг). Биологический анализ криля проводили на свежем материале согласно общепринятым методикам и рекомендациями Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ) [2, 3, 19].

Измерение длины тела криля выполняли по стандарту АНТКОМ – от внешнего края глаза до конца тельсона с точностью до 1 мм [7]. Идентификацию стадии зрелости или репродуктивного состояния проводили по Макарову и Денис [19]. Согласно этой шкале у субадультных (незрелых) самцов) выделяют стадии 2А1, 2А2, 2А3, у взрослых созревающих самцов – стадию 3А и у зрелых самцов (М) – стадию 3В. У самок выделяют стадию субадультной самки –2В, взрослых самок (F) – стадии разной прогрессии 3А, 3B, 3С, 3D и стадию отнерестившейся самки –3E.

На исследованных станциях выполнены соответствующие гидрофизические наблюдения [4, 13].

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием языка программирования "R" (v. 4.4.2) в среде разработки "RStudio" с применением дополнительных пакетов: "readxl" (v. 1.4.1), "tidyverse" (v. 1.3.2), "vegan" (v. 2.6–4). Распределение совокупности половозрелых особей (самцы и самки) разных стадий развития и неполовозрелых особей (ювенильных) по станциям и полигонам оценивали при помощи алгоритма неметрического многомерного шкалирования (NMDS). Для определения наилучшей метрики расстояний в многомерном пространстве признаков использовали коэффициент корреляции Спирмена между матрицами дистанций [1, 6]. На ординационной диаграмме, полученной методом NMDS, по эмпирическим значениям отдельных абиотических факторов (температура, соленость, кислород, хлорофилл "а") подгонялись обобщенные аддитивные модели с отрисовкой изолинии трехмерной сглаживающей поверхности для оценки экологического оптимума отдельных стадий развития криля [28]. Для определения степени сходства между исходной матрицей расстояний и расстояниями между точками вводится функция стресса, Stress. Стресс равный нулю обозначает полную тождественность сравниваемых матриц. Оценку влияния комплекса внешних абиотических факторов среды (температура, соленость, кислород и хлорофилл "a") на встречаемость криля проводили с помощью алгоритма канонического анализа соответствий (ССА) [6].



Рис. 1. NMDS ординация распределения самцов, самок и ювенильных особей атлантического криля *Euphausis superba* на разных стадиях развития в разных районах.

Выявление наилучшей метрики расстояний осуществляли также с использованием коэффициента Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологические факторы, особенно абиотического характера, а также специфика водных сообществ морских экосистем и их видовое разнообразие определяют ее устойчивость в целом. Морские гидробионты Антарктики, в том числе антарктический криль, выделяются рядом общих экологических и биологических особенностей, среди которых отдельно стоит выделить темпы роста, размерно-массовые характеристики, уровень липидного и энергетического обмена. Эти признаки и особенности физиологического состояния и биохимического метаболизма организма сформировались у этих животных в условиях действия специфических факторов местообитания.

Результаты гидрофизических измерений и сведения о составе и структуре планктонных сообществ Атлантического сектора Антарктики в обследованных районах в рамках АМК-87 приведены в серии недавних публикаций [4, 8, 13, 17].

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

На рис. 1 представлено ординационное распределение станций с группировкой по районам в многомерном пространстве изучаемых признаков (встречаемость особей на разных стадиях зрелости) согласно алгоритму неметрического многомерного шкалирования (NMDS).

Установлено ординационное смещение ювенильных особей, самцов и самок на ранних стадиях половой зрелости (M-2A1, M-2A3, F-2B) в сторону более плотного концентрирования таковых на станциях пролива Брансфилда и к востоку от Антарктического полуострова. Более зрелые особи (М-3А, М-3В, F-3В, F-3D, F-3Е) смещаются и группируются в районах бассейна Пауэлла моря Уэдделла и к востоку от Южных Оркнейских о-вов. Разнонаправленная ординация самок 3А и самцов 2А2 в бассейне Пауэлла моря Уэдделла указывает на влияние абиотических (гидрофизические параметры, среди которых ключевым является температура) и биотических факторов (трофика) среды на неоднородное распределение криля данных стадий развития в пределах указанного района. Установленные различия в зрелости криля в проливе Антарктик (преобладание ювенильных особей на станции 7332 (дневной улов, 0-490 м) и половозрелых особей на



Рис. 2. Ординация антарктического криля *Euphausia superba* на разных стадиях развития методом NMDS с наложением изолиний сглаживающих поверхностей для температуры, солености, хлорофилла "а" и растворенного кислорода на горизонте 0–200 м.

станции 7331 (ночной улов, 0–440 м)) отражают суточную динамику распределения *E. superba* в водной толще.

Для моделирования совокупности оптимальных основных экологических условий (температура, соленость, хлорофилл "а", кислородный режим) на пространственное распределение антарктического криля были построены обобщенные аддитивные модели по каждой станции в пространстве ординации NMDS с добавлением сглаживающих изолиний для горизонта 0-200 м (наиболее плотно осваиваемый крилем) и с учетом горизонта, где происходят активные вертикальные миграции, но не глубже 500 м (с учетом горизонтов наших тралений) (рисунки 2 и 3). Согласно полученным моделям, для всех стадий развития криля оптимальная температура для разных горизонтов составляет 0.1-0.4°С. Модель подтверждает и выводы, сделанные в предыдущем рейсе [5] о том, что неполовозрелые особи тяготеют к более холодным водам по сравнению со зрелыми. Проведенный нами анализ температур по данным предыдущей, 79, экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш" (АМК-79) для станций, где доминировала молодь криля, подтверждают данный вывод [5].

Уровень солености не оказывает существенного влияния на распределение криля на разных стадиях развития (в расчет заложены данные по солености, полученные в рамках рейса), и оптимальным является диапазон 34.5—34.6‰. Концентрация хлорофилла "а" и содержание растворенного в воде кислорода, наоборот, оказывают существенное влияние на распределение неполовозрелых и половозрелых особей в отношении требования более высоких его концентраций у ювенильных особей и особей на ранних стадиях половой зрелости, обитающих на разных глубинах. Известно [18], что процесс созревания самок криля зависит от температуры воды, уровня хлорофилла "а" и протекает в течение нескольких месяцев (до 3 мес.) при регулярной линьке.

Получены данные о совокупности основных абиотических факторов среды и их значениях, являющихся оптимальными для жизнедеятельности ювенильных и половозрелых особей криля. Определен ряд абиотических факторов среды, оказывающих влияние на распределение антарктического криля в обследованном регионе (по убывающей): температура (оптимальный диапазон $0.1-0.4^{\circ}$ С, для молоди криля нижняя граница может составлять -0.5° С), уровни хлорофилла "а" и растворенного кислорода в воде. При этом криль, по всей видимости, оказывается менее чувствительным к соленостным условиям.



Рис. 3. Ординация антарктического криля *Euphausia superba* на разных стадиях развития методом NMDS с наложением изолиний сглаживающих поверхностей для температуры, солености, хлорофилла "а" и растворённого кислорода на горизонте 0-500 м.

Однако следует принимать во внимание, что диапазон колебаний этого фактора в исследованных районах был незначительным (не более 2%) в активно населяемом особями слое водной толщи. Отмечается, что подходящими для развития ювенильных особей условиями являются пониженные температуры и высокий уровень растворенного в воде кислорода по сравнению с таковыми для половозрелых особей, что связано с особенностями физиолого-биохимического состояния антарктического криля на разных стадиях онтогенетического развития (Мурзина и др., неопубл. данные).

Результаты настоящего исследования имеют значение для выявления факторов и механизмов, определяющих функционирование и динамику живых систем в отдельных районах Мирового океана, на примере антарктического криля, как ключевой экосистемной единицы Антарктики. Они также дополняют (на основе комплексных исследований экологии, поведения, физиологии, морфологии и экологической биохимии) сведения о формировании адаптивных стратегий живых систем. Особое значение результаты модельных расчетов имеют для мониторинга состояния экосистем Антарктики и их компонентов в условиях изменяющихся факторов среды, включая современные тенденции изменения климата, в том числе в свете планирования возобновления

ОКЕАНОЛОГИЯ 2023 том 63 № 4

промысла и разработки научно-поисковых программ в этом регионе.

Благодарности. Авторы выражают глубочайшую благодарность административному корпусу рейса АМК-87. а также экипажу НИС "Акалемик Мстислав Келдыш" за всестороннюю помощь и поддержку в ходе выполнения экспедиционных работ и исследований. Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ИО РАН А.В. Мишину, К.В. Минину и В.Л. Семину за профессиональное проведение траловых работ и помощь в разборе материала, а также Д.И. Фрею за научные рекомендации и помощь при работе с гидрофизическими данными.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FMWE-2022-0001, ГЗ КарНЦ РАН FMEN-2022-0006, а также при финансовой поддержке Гранта Президента РФ для молодых докторов наук МД-5761.2021.1.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кабаков Р.И. R в действии: анализ и визуализация данных в программе. М.: ДМК Пресс, 2016. 580 с.
- 2. Методические рекомендации по сбору и обработке промысловых и биологических данных по водным биоресурсам Антарктики для российских научных

наблюдателей в зоне действия Конвенции АНТ-КОМ. М.: ВНИРО, 2014. 103 с.

- Методические указания по сбору и первичной обработке в полевых условиях материалов по биологии и распределению антарктического криля. М.: ВНИРО, 1982. 102 с.
- 4. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825–827.

https://doi.org/10.31857/S003015742205015X

- Спиридонов В.А., Залота А.К., Яковенко В.А., Горбатенко К.М. Состав популяции и транспорт молоди антарктического криля в районе бассейна Пауэлла (северо-западая часть моря Уэдделла) в январе 2020 г. // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 33–51.
- Шитиков В.К., Мастицкий С.Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. [Электронный ресурс]. Адрес доступа: https://github.com/ranalytics/data-mining (дата обращения: 26.01 2023 г.).
- 7. *Anonymous*. Scientific Observers Manual. CCAMLR: Hobart, Australia. 2011. P. 1–232.
- 8. *Bitiutskii D.G., Samyshev E.Z., Minkina N.I., et al.* Distribution and demography of Antarctic krill and salps in the Atlantic Sector of the Southern Ocean during austral summer 2021–2022 // Water. 2022. V. 14. Article ID 3812.

https://doi.org/10.3390/w14233812

- Buchholz F. Moult cycle and growth of Antarctic krill Euphausia superba in the laboratory // Marine Ecology Progress Series. 1991. V. 69. P. 217–229.
- Cavan E.L., Belcher A., Atkinson A. et al. The importance of Antarctic krill in biogeochemical cycles // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Article ID 4742. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12668-7
- Clarke A., Tyler P. Adult Antarctic Krill Feeding at Abyssal Depths // Current Biology. 2008. V. 28. P. 282– 285.
 https://doi.org/10.1016/j.eub.2008.01.050

https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.01.059

- Cleary A.C., Durbin E.G., Casas M.C., Zhou M. Winter distribution and size structure of Antarctic krill Euphausia superba populations in-shore along the West Antarctic Peninsula // Marine Ecology Progress Series. 2016. V. 552. P. 115–129. https://doi.org/10.3354/meps11772
- Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // Water. 2022. V. 14. Article ID 3193. https://doi.org/10.3390/w14203193
- Ikeda T., Dixon P. Observations on moulting in Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) // Australian Journal of Marine and Freshwater Research. 1982. V. 33. P. 71–76.

https://doi.org/10.1071/MF9820071

 Johnston N.M., Murphy E.J., Atkinson A. et al. Status, change, and futures of zooplankton in the Southern Ocean // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. V. 9, 624692. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.624692

- 16. Kane M.K., Yopak R., Roman C., Mendel-Deuer S. Krill motion in the Southern Ocean: quantifying in situ krill movement behaviors and distributions during the late austral autumn and spring // Limnology and Ocenography. 2018. V. 63. Iss. 6. P. 2839–2857. https://doi.org/10.1002/lno.11024
- 17. Kasyan V.V., Bitiutskii D.G., Mishin A.V. et al. Composition and distribution of plankton communities in the Atlantic Sector of the Southern Ocean // Diversity. 2022. V. 14. № 11. Article ID 923. https://www.doi.org/10.3390/d14110923
- Kawaguchi S., Yoshida T., Finley L. et al. The krill maturity cycle: a conceptual model of the seasonal cycle in Antarctic krill // Polar Biology. 2007. V. 30. P. 689– 698.

https://doi.org/10.1007/s00300-006-0226-2

- Makarov R.R., Denys C.J. Stages of sexual maturity of Euphausia superba Dana // BIOMASS Handbook. 1981. Iss. 11. P. 1–13.
- Manno C., Fielding S., Stowasser G. et al. Continuous mounting by Antarctic krill drives major pulses of carbon export in the north Scotia Sea, Southern Ocean // Nature Communications. 2020. V. 11. Article ID 6051. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19956-7
- McBride M.M., Schram Stokke O., Renner A.H.H. et al. Antarctic krill Euphausia superba: spatial distribution, abundance, and management of fisheries in a changing climate // Marine Ecology Progress Series. 2021. V. 668. P. 185–214. https://doi.org/10.3354/meps13705
- 22. Murphy E.J., Cavanagh R.D., Drinkwater K.F. et al. Understanding the structure and functioning of polar pelagic ecosystems to predict the impacts of change // Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences. 2016. V. 283. Iss. 1844. Article ID 20161646. https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1646
- 23. Perry F.A., Atkinson A., Sailley S.F. et al. Habitat partitioning in Antarctic krill: spawning hotspots and nursery areas // PLoS One. 2019. V. 14. Article ID e0219325. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219325
- Ross R.M., Quetin L.B., Baker K.S. et al. Growth limitation in young Euphausia superba under field conditions // Limnology and Oceanography. 2000. V. 45. P. 31–43. https://doi.org/10.4319/10.2000.45.1.0031
- 25. Smith C.R., Mincks S.L., DeMaster D.J. A synthesis of bentho-pelagic coupling on the Antarctic shelf: food banks, ecosystem inertia and global climate change // Deep Sea. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. V. 53. Iss. 8–10. P. 875–894. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.02.001
- Taki K., Yabuki T., Noiri Y. et al. Horizontal and vertical distribution and demography of euphausiids in the Ross Sea and its adjacent waters in 2004/2005 // Polar Biology. 2008. V. 31. P. 1343–1356. https://doi.org/10.1007/s00300-008-0472-6
- 27. Wiedenmann J., Cresswell K., Mangel M. Temperaturedependent growth of Antarctic krill: predictions for a changing climate from a cohort model // Marine Ecology Progress Series. 2008. V. 358. P. 191–202. https://doi.org/10.3354/meps07350
- 28. *Wood S.N.* Generalized additive models: an introduction with R. Chapman, Hall/CRC, 2006. 410 p.

Modeling of the Distribution and Relationship with Abiotic Environmental Factors of Juvenile and Adult Antarctic Krill *Euphausia superba* Based on Actual Hydrophysical Measurements

S. A. Murzina^{a, c, #}, V. P. Voronin^a, D. G. Bitiutskii^{a, b}, A. M. Orlov^{c, d}

^aInstitute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia ^bAzov-Black Sea Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don, Russia

> ^cShirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia ^dTomsk State University, Tomsk, Russia [#]e-mail: murzina-svetlana@gmail.com

The results of statistical processing of the occurrence of krill individuals depending on some environmental factors, based on the actual data of hydrophysical measurements, at the studied stations in the Powell Basin of the Weddell Sea, the Bransfield Strait and Antarctic Sound, as well as off the South Orkney Islands in the austral summer of 2022 are discussed. Data were obtained on the association of the main abiotic environmental factors and their values, which are optimal for juvenile and mature krill individuals, and a number of abiotic environmental factors that affect the distribution of Antarctic krill in the studied region were identified. The results of such statistical modeling are important for monitoring the state of Antarctic ecosystems and their components under changing environmental factors, including current trends in climate change.

Keywords: Antarctic krill *Euphausia superba*, ecological factors, statistical modelling, distribution, Atlantic sector of Antarctic

——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 597.05.574

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ГЛУБОКОВОДНЫХ ПЕЛАГИЧЕСКИХ ИХТИОЦЕНОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА (БАССЕЙН ПАУЭЛЛА) И ПРОЛИВА БРАНСФИЛДА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2020 И 2022 г.

© 2023 г. С. Г. Кобылянский^{1, *}, А. В. Мишин¹, А. М. Орлов^{1, 2, 3}, Н. В. Гордеева^{1, 4}, Р. З. Мухаметьянов¹

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия ³Томский государственный университет, Томск, Россия ⁴Институт общей генетики имени Н.И. Вавилова РАН, Москва, Россия *e-mail: kobylianskysg@gmail.com Поступила в редакцию 01.12.2022 г. После доработки 14.02.2023 г. Принята к публикации 16.02.2023 г.

Приведен обзор состава и структуры глубоководных пелагических ихтиоценов пролива Брансфилда и северной части моря Уэдделла (бассейн Пауэла) Атлантического сектора Южного океана. Материал получен летом 2020 и 2022 гг. на 26 станциях на горизонтах от 120-0 до 2200-0 м. Был собран 901 экз. молоди и взрослых рыб 19 видов из 10 семейств. Статистический анализ позволил выделить 4 достоверно различающихся района, доминирующие ихтиоцены в которых располагались в водах различного происхождения. Эти ихтиоцены бедны по числу выявленных видов, но зачастую довольно многочисленны. В районе Антарктического пролива и на шельфе Антарктического полуострова преобладали относительно мелководные, эндемичные для шельфа и склона Антарктиды представители семейств Bathydraconidae, Channichthyidae, Liparidae, Nototheniidae, тогда как в проливе Брансфилда, абиссальной котловине бассейна Пауэлла, а также в пелагиали над глубоководными хребтами и желобами, окаймляющими его с севера – мезо- и батипелагические рыбы из сем. Мусthophidae, Bathylagidae, Gonostomatidae, Paralepididae и Scopelarchidae. Вблизи северной границы бассейна Пауэлла число пойманных мезо- батипелагических видов и средняя их численность оказались выше, чем в его центральной части (11 против 7 видов и 63.5 против 84.1 экз./100 м²). В центральной части бассейна доминировал Bathylagus antarcticus, доля которого в уловах в среднем составляла 40%, а численность – 28.8 экз./100 м², тогда как в северной его части преобладала *Electrona* antarctica, доля которой в уловах была в среднем 33%, а численность – 27.4 экз./100 м².

Ключевые слова: биоразнообразие, структура и численность пелагических ихтиоценов, Антарктика, море Уэдделла, мезопелагиаль, батипелагиаль, гидрофизическая структура вод **DOI:** 10.31857/S003015742304007X, **EDN:** YMPZBU

введение

Современный облик ихтиофауны Южного океана сформировался около 30 млн лет назад вместе с появлением пролива Дрейка и последующим формированием системы Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), что привело к изоляции и охлаждению антарктических водных масс, а также к возникновению массивного ледяного щита над антарктическим континентом [3, 22]. Данные процессы вызвали исчезновение многих таксономических групп рыб, характерных для прочих районов Мирового океана, и способствовали эволюции уникальной ихтиофауны с крайне высоким уровнем эндемизма и доминированием представителей подотряда Notothenioidei. Ихтиофауна Антарктики менее разнообразна, чем можно было бы ожидать, учитывая ее значительный возраст и обширные объемы водной толщи, занимаемые ихтиоценами. Согласно последним данным описано 374 вида антарктических морских рыб из 19 семейств, которые при этом составляют лишь чуть более 1% мировой морской ихтиофауны. Четверть всех известных видов рыб данного региона обитает в пределах мезо- и батипелагиали [25]. Глубоководная пелагическая ихтиофауна Южного океана также характеризуется низким видовым разнообразием и высокой степенью видового эндемизма [14, 16]. Наиболее многочисленные таксономические группы обитающих здесь глубоководных мезо- и батипелагических рыб относятся к семействам Myctophidae, Bathylagidae, Paralepididae, Gonostomatidae и Scopelarchidae [4, 17, 25, 26]. Виды из этих семейств составляют более 95% биомассы всей мезопелагической ихтиофауны верхнего километрового слоя, обитающей в регионе морей Уэдделла-Скотия [29]. Сюда же также относится и антарктическая серебрянка *Pleuragramma antarcticum* — единственный представитель семейства Nototheniidae с пелагическим жизненным циклом [11, 45].

При изучении особенностей состава и структуры морских пелагических экосистем Антарктики как правило центральная роль и основное внимание отводится эвфаузиидам (Euphausiidae) и, в частности, антарктическому крилю Euphausia superba, как основному источнику пищи для антарктических птиц и морских млекопитающих, а также важнейшему объекту промышленного рыболовства. Однако, по мере накопления знаний становится все более очевидным, что трофические связи в этом регионе намного сложнее, чем изначально предполагалось концепцией "фитопланктон-криль-высшие хищники" и для понимания целостной картины их функционирования также необходимо адекватно учитывать вклад мезо- и батипелагической ихтиофауны, как ключевого трофического компонента морских сообществ [7]. Являясь потребителями мелкоразмерного растительноядного зоопланктона, мезо- и батипелагические рыбы, в свою очередь, играют важную роль в качестве промежуточного звена между первичными консументами и хищниками высшего трофического уровня [18, 42], обеспечивая тем самым стабильность антарктических экосистем за счет создания в них альтернативных трофических путей, в которых роль криля не столь существенна. В тех районах Антарктики, где численность криля низка, сообшества пелагических рыб вносят основной вклад в биомассу в верхнем 1000-метровом слое как в океанических, так и в глубоководных прибрежных районах под паковыми льдами [29, 30, 32]. Таким образом, изучение видового состава, распределения и условий существования антарктической ихтиофауны необходимо для прогнозирования влияния возможного снижения численности криля, вызванного антропогенными и/или климатическими факторами, на трофическую структуру сообществ Южного океана.

Акватория вокруг Антарктического полуострова, а также пограничный район между морями Соктия и Уэдделла являются одним из наиболее изученных районов Антарктики. Несмотря на большое число исследований, посвященных различным сторонам функционирования глубоководных пелагических экосистем данного региона, лишь небольшая их доля касается непосред-

ственно особенностей распределения и видового состава пелагических сообществ рыб [36, 40, 43]. Судя по литературным данным, при изучении антарктических ихтиоценов в указанных районах, помимо взрослых рыб, много внимания уделялось исследованию видового состава и численности ранних пелагических стадий нототениевых рыб из приловов тралений антарктического криля [6, 23, 24]. При этом, как правило, облавливался верхний 200-400-м слой, что приводило к заметному недоучету вклада мезопелагических видов. Часто сведения о составе рыбных сообществ района приводятся совместно с данными о макрозоопланктоне [12, 29, 30, 35], значительно усложняющими их интерпретацию и сравнение. В ходе предыдущих исследований установлены состав и общие закономерности распределения видов, принадлежащих к пелагическим ихтиоценам [10]. Показано, что над шельфом пелагическая ихтиофауна представлена главным образом молодью демерсальных нототений и белокровных щук (Notothniidae, Channichtvidae) и в меньшей степени различными стадиями развития мезопелагических видов [21, 23, 24], тогда как над шельфовым склоном и в открытом океане преобладают молодь и взрослые особи мезопелагических видов с явным доминированием по численности и биомассе представителей семейств Myctophidae, Bathylagidae и Paralepididae [12, 29, 30, 39]. Лишь на акватории западной части Антарктического полуострова, где циркумполярные глубинные воды выходят на шельф, данная закономерность нарушается, что способствует выносу мезопелагических рыб в прибрежные районы [13]. Помимо рельефа дна, другим важным фактором, определяющим структуру сообществ, является широтная зональность. По мере удаления от материка на север ближе к центральной части Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) заметно возрастает численность и расширяется видовой состав мезопелагических рыб [42].

Основной целью настоящего исследования являлось изучение биоразнообразия глубоководных ихтиоценов и закономерностей распределения популяций массовых видов пелагических рыб в летний период в проливе Брансфилда и мало изученной северной части моря Уэдделла (бассейн Пауэлла) в зависимости от структуры водных масс.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материал для настоящей работы собран в 79 и 87 рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш", которые были проведены соответственно 24.01— 22.02.2020 г. и 22.01—12.02.2022 г. Район работ в обоих рейсах охватывал пролив Брансфилда, северную часть моря Уэдделла (Бассейн Пауэлла), а также район Южных Оркнейских о-вов (воды над Оркнейским желобом и желобом Лори) (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения станций в районе работ в 79 и 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш". ● – 2020, ● – 2022, цветом показаны горизонты лова: ● – 400–0, ● – 500–0, ● – 1000–0, ● – 1500–0, ● – 2000–0 м.

Для сбора ихтиологических материалов использовался не замыкающийся разноглубинный пелагический трал Айзекса-Кидда в модификации Самышева-Асеева (РТАКСА), оснащенный двойным мешком длиной 25 м; наружный мешок был изготовлен из узловой капроновой дели из нити диаметром 1 мм с ячеей 50 мм; внутренний – из узловой дели с ячеей 5 мм и кутовой вставкой из капронового сита № 15. Площадь устья трала 6 м². Всего в 2020 г было выполнено 16 траловых станций, на которых было отобрано 17 проб, а в 2022 г. – 10 траловых станций, на которых отобрано 10 проб (табл. 1). Ловы проводились как в прибрежных, так и в удаленных от берегов районах на горизонтах от 120-0 до 2212-0 м при скорости судна 3 узла без длительной экспозиции трала на каком-либо из проходимых горизонтов. Нижняя граница горизонта лова определялась по показаниям датчика температуры и давления Senti DT фирмы Star-Oddyi. Расстояние, пройденное судном между точками начала и конца траления, рассматривалось, как расстояние по ортодромии [48] и рассчитывалось в интернет-калькуляторе [38].

Расстояние, пройденное тралом на каждой станции, вычислялось с использованием опубликованных ранее уравнений [46]. Объем профильтрованной воды определялся умножением площади устья трала на расстояние между начальной и конечной точками траления. Численность пойманных рыб в каждом трале рассчитывалась исходя из объёма профильтрованной воды. Биомасса пойманных рыб приведена в тексте для тех станций, где в 2022 г. были проведены соответствующие измерения, но не учитывалась в сравнительных целях, поскольку при отборе проб не замыкающимся орудием лова неизбежна ее недооценка, связанная с эффектом уклонения от орудия лова отдельных наиболее крупных и/или подвижных экземпляров пелагических рыб [15], какими в Антарктических водах являются, например, виды Paralepididae. Оказывая небольшое влияние на общую численность рыб в улове, этот эффект в значительной мере может занижать суммарную биомассу пробы. Первоначально пробы фиксировались 2–4% формалином, нейтрализованным морской водой, затем они переводились в 75%-й этанол.

Статистический анализ проводили с помощью пакета программ PRIMER ver. 6 [8]. Обработка данных базировалась на матрице видового сходства проб, рассчитанной на основе индекса Брея-Кёртиса; в качестве исходных данных использовали процентное соотношение видов и число рыб в пробе. Для уменьшения влияния вклада доминирующих видов, перед построением матрицы сходства данные были трансформированы путем извлечения квадратного корня. При проведении статистического анализа результатов была выполнена кластеризация методом попарного внутригруппового невзвешенного среднего (UPGMA) [41] и ординация методом неметрического многомерного шкалирования (MDS) [28]. Для оценки надежности результатов кластеризации проводили перестановочный тест SIMPROF (число повторов 999, p = 0.05). Стандартизация и трансформация данных не применялась.

Сведения о гидрофизических параметрах среды (температуры и солености в толще воды) получены в процессе вертикальных зондирований. В 2020 г. для получения профилей температуры и солености применялся гидрофизический зонд SBE 19plus; были использованы данные 11 зондирований. В 2022 г. гидрологические измерения велись с помощью зонда Idronaut OCEAN SEVEN

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА

Номер станции	Дата	Координаты начало ю.ш.; з.д	Координаты конец ю.ш.; з.д	№ пробы	Горизонт лова (м)	Объем профильтро- ванной воды (м ³)
6597	24.01.2020	60°52′58″; 53°54′15″	60°53'22"; 53°52'52"	1	507-0	30886
6601	25.01.2020	60°51′40″; 51°34′19″	60°54'25"; 51°20'37"	2	1432-0	80460
6601	25.01.2020	60°56′01″; 51°13′01″	60°56′57″; 51°08′02″	3	305-0	28920
6607	28.01.2020	61°43′30″; 48°48′47″	61°41′04″; 48°47′01″	4	1752—0	92400
6614	29.01.2020	60°53'20"; 45°32'30"	60°53'28"; 45°33'28"	5	120-0	5460
6617	31.01.2020	61°06 '24"; 49°41'12"	61°06'24"; 49°28'48"	6	2212-0	66840
6619	01.02.2020	62°22'34"; 53°15'54"	62°18′54″; 53°09′04″	7	1100-0	54060
6648	13.02.2020	63°29'47"; 56°31'21"	63°31′58″; 56°27′17″	8	650-0	31680
6651	15.02.2020	62°32'27''; 53°33'54''	62°35′55″; 53°33′43″	9	505-0	38640
6653	16.02.2020	62°25′21″; 52°31′37″	62°27′10″; 52°15′55″	10	1626—0	83580
6655	17.02.2020	62°28'46''; 50°57'07''	62°17′58″; 50°52′11″	11	2143-0	123060
6684	21.02.2020	60°38′53″; 50°21′21″	60°35'20"; 50°27'29"	12	1153—0	51900
6685	22.02.2020	60°21′16″; 49°25′51″	60°19′15″; 49°11′26″	13	2062-0	82740
6686	22.02.2020	60°32′03″; 48°48′06″	60°32'35"; 48°37'57"	14	1318-0	56040
6687	22.02.2020	60°20'55"; 48°35'12"	60°21′14″; 48°29′10″	15	634–0	33480
6688	22-23.02.2020	60°21′29″; 48°27′17″	60°21′16″; 48°04′39″	16	1765—0	124980
6690	24.02.2020	59°47'24"; 50°25'32"	59°41'37"; 50°38'27"	17	1400-0	97080
7300	22.01.2022	62°28'43"; 58°12'30"	62°26′19″; 58°21′23″	18	1160-0	53004
7302	23.01.2022	62°45′46″; 58°15′10″	62°48′10″; 58°09′30″	19	440-0	32892
7331	28.01.2022	63°25'31"; 56°39'42"	63°27′52″; 56°35′19″	20	590-0	32114
7344	30.01.2022	62°58′8″; 52°35′51″	62°56′13″; 52°29′14″	21	550-0	39559
7358	02.02.2022	61°48′36″; 55°39′22″	61°44″16″; 55°25′24″	22	1000-0	87896
7362	05.02.2022	61°15′26″; 50°43′11″	61°14′10″; 50°26′18″	23	1700-0	90896
7367	07.02.2022	61°14′53″; 47°26′50″	61°09'37"; 47°20'37"	24	1500-0	67339
7378	10.02.2022	60°35′58″; 42°11′32″	60°38'47"; 41°54'39"	25	1520-0	97452
7383	11.02.2022	16°03'57"; 46°41'03"	16°12'32; 46°41'03''	26	1750-0	99119
7385	12.02.2022	60°13'41"; 44°58'22"	60°14'8"; 45°16'21"	27	1900-0	99564

Таблица 1. Положение станций, на которых были отобраны пробы РТАКСА в 79 и 87 рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш" в январе-феврале 2020 и 2022 гг.

320Plus, опускаемого на кабель-тросе от поверхности до дна. Для построения разрезов использовались данные 34 зондирований. Для описания структуры вод в 2020 и 2022 г. было выбрано в общей сложности 5 гидрофизических разрезов (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности структуры вод на исследованных полигонах работ. Для описания гидрофизических условий в районе съемки 2020 г. были выбраны разрезы, проходившие через шельф и централь-

КОБЫЛЯНСКИЙ и др.



Рис. 2. Схема расположения гидрофизических разрезов в 2020 (а) и 2022 (б) (○ – гидрофизические станции, 1 – разрез через бассейн Пауэлла, 2 – разрез над подводными поднятиями бассейна Пауэлла, 3 – разрез через шельф Антарктического п-ва, котловину бассейна Пауэлла и Южно-Оркнейское плато, 4 – пролив Брансфилд, 5 – Антарктический пролив).



Рис. 3. Распределение температуры и солености в районе исследований на разрезе через шельф и котловину бассейна Пауэлла в 2020 г. (AASW – Antarctic Surface Water (антарктическая поверхностная водная масса), WDW – Warm Deep Water (теплый глубинный слой), CIL – Cold Intermediate Layer (холодный промежуточный слой).

ную часть бассейна Пауэлла, а также район хребтов Филип и Саут-Скотия (рис. 3, 4).

Гидрологическая структура вод на станциях в юго-восточной части разреза (ст. 6651–6653, 6656) (рис. 3) характеризовалась наличием переохлажденного верхнего слоя толщиной от 300 до 200 м с отрицательной температурой $-1.5...-2^{\circ}$ С и относительно низкой соленостью 33.2–34.4 psu, что являлось следствием летнего таяния ледяного покрова, препятствующего прогреву поверхностного слоя вод. На шельфе данный переохлажденный слой располагался от поверхности до дна, тогда как на станциях в центральной части бассейна Пауэлла ниже него располагался слой относительно теплой (0–0.6°С, 34.6 psu) глубинной воды (WDW), которая занимала горизонты примерно от 300 до 1500–1700 м. На станциях в северо-во-

сточной части разреза (ст. 6607-6610) структура вод была типичной для моря Уэдделла в летний период [2]. В верхних 100-150 м располагался прогретый летний поверхностный слой с сильным вертикальным градиентом температуры. Под ним на глубине около 200 м был расположен летний холодный промежуточный слой (CIL) с подповерхностным минимумом температуры с отрицательными значениями около −0.5°C (рис. 3). Далее залегал слой теплой глубинной воды с температурой до 0.6°C на глубине около 500 м; далее ко дну температура уменьшалась. На станциях в северо-западной части района исследований (ст. 6601, 6602) (рис. 4), наблюдалась несколько другая гидрофизическая картина: воды, поступающие из западной части моря Уэдделла вместе с дрейфующим льдом и большим количеством айс-



Рис. 4. Распределение температуры и солености на разрезе над подводными поднятиями в северной части бассейна Пауэлла в 2020 г. (расшифровка латинской аббревиатуры как в рис. 3).

бергов (шельфовые воды моря Уэдделла), подвергались здесь перемешиванию на подводных поднятиях за счет внутренних волн, генерируемых приливно-отливными течениями. В результате формировалась слабо стратифицированная вертикальная структура, где глубинный максимум температуры не был выражен.

В январе 2022 г. распределение основных гидрофизических характеристик в бассейне Пауэлла также в целом соответствовало среднемноголетней норме [34] и отличалось от 2020 г. лишь более выраженным прогревом поверхностного слоя, чему способствовало отсутствие тающего льда и отступления ледовой кромки южнее границы 2020 г. На разрезе можно выделить три слоя: верхний слой мощностью от 20 до 100 м занимала Антарктическая поверхностная вода, образующаяся при летнем нагреве. Температура увеличивалась с юга на север от 0.5 до 2°С. В распределении солености присутствовали локальные минимумы, вероятно, связанные с таянием льдов; в основном их значения находились в пределах 34.40-34.50 psu. Ниже располагался холодный промежуточный слой (CIL) – результат зимней конвекции. Его толщина варьировала от 50 до 150 м (рис. 5). Минимальные значения потенциальной температуры наблюдались на склоновых станциях (ст. 7345-7348) и достигали -1.69°С, соленость при этом плавно увеличивалась с глубиной без значительных градиентов. Начиная с глубин 200 м в центральной глубоководной части бассейна Пауэлла наблюдалось присутствие теплых глубинных вод, хорошо определявшихся по нулевой изотерме [5, 31] и соответствовавших солености 34.70 psu. Поднятию изолиний температуры и солености в центральной части бассейна Пауэлла способствовало наличие здесь циклонической циркуляции.

В 2022 г. в проливе Брансфилда наблюдалась типичная для данного района термохалинная структура вод [20, 27, 44]: большую часть пролива занимала холодная, соленая с отрицательной температурой, модифицированная вода моря Уэдделла (TWW). При этом вдоль Южных Шетландских о-вов с течением Брансфилда узкой струей также распространялась теплая и опресненная модифицированная вода моря Беллинсгаузена (TBW), которая в верхних 50 м заходила и на середину пролива (рис. 6). Нижняя часть струи течения Брансфилда представляла собой модифицированную циркумполярную глубинную воду (mCDW) – более теплую и соленую с ядром на глубине 300 м.

Разрез через Антарктический пролив (Antarctic Sound) (рис. 7) был характерен уменьшением температуры и солености с севера на юг. Северная мелководная часть пролива (ст. 7324, 7325), вероятно, была заполнена водами из пролива Брансфилда, которая отличалась более высокой потенциальной температурой, с ее максимумом -0.10°С в верхнем 60 м слое. Здесь же наблюдалась и повышенная соленость воды, только, в отличие от температуры, ее максимум находился в придонном слое и составлял 34.55 psu на глубинах около 150 м. Глубоководная центральна часть пролива была подвержена влиянию вод из моря Уэдделла с более низкой температурой и относительным опреснением за счет таяния льда в верхнем 100 м слое.

Ловы РТАКСА на разных полигонах работ. Коллекция молоди и взрослых рыб, собранная с помощью РТАКСА в 2020 и 2022 г. включала в себя 901 экз., в сумме относящихся к 19 видам из 10 семейств (табл. 2).

КОБЫЛЯНСКИЙ и др.



Рис. 5. Распределение температуры и солености на разрезе через бассейн Пауэлла (1), Южно-Оркнейское плато (2) и Оркнейский желоб (3) в 2022 г. (расшифровка латинской аббревиатуры как в рис. 3, SW – Shelf Water (шельфовые воды)).



Рис. 6. Распределение температуры и солености на разрезе через пролив Брансфилда летом 2022 г. (TBW – Transitional Zonal Water with Bellingshausen influence (модифицированная вода моря Белинсгаузена), TWW – Transitional Zonal Water with Weddell Sea influence (модифицированная вода моря Уэдделла), mCDW – modified Circumpolar Deep Water (модифицированная циркуполярная вода)).

В результате кластерного анализа собранных материалов, включающего в себя перестановочный тест SIMPROF, были выявлены 4 основные группы проб (A, B, C и D) на уровне сходства 4.7% ($\pi = 7.0, p = 0.001$), 29.3% ($\pi = 3.3, p = 0.009$) и 41.6% ($\pi = 2.5, p = 0.032$); на более высоком уровне статистически значимая структура данных не наблюдалась (рис. 8).

Графически все выделенные группы на MDSдиаграмме представлены в виде облака точек, или отдельных точек, которые, тем не менее, хорошо обособленны друг от друга (рис. 9).

Пробы группы А охватывали подавляющее большинство ихтиологических сборов, выполненных летом 2020 и 2022 гг. в глубоководных районах бассейна Пауэлла моря Уэдделла, а также над желобами и подводными поднятиями, окаймляющими с северо-запада и северо-востока данный бассейн. Материалы были собраны на 17 станциях на горизонтах от 634–0 (ст. 6687) до

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА



Рис. 7. Распределение температуры и солености на разрезе через Антарктический пролив летом 2022 г.



Рис. 8. Результаты кластерного анализа проб РТАКСА в районе работ в 79 и 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" летом 2020 и 2022 г. А, В, С, D— значимые (*p* = 0.05) группы проб, установленные с помощью теста SIMPROF. (А – бассейн Пауэлла и воды над желобами и подводными поднятиямим, окаймляющими его северную часть, В – пролив Брансфилда и сопредельные воды в зоне влияния течения Брансфилда, С – Антарктический пролив, D – шельфовые воды в западной части Бассейна Пауэлла.

2212—0 м (ст. 6617). Всего в пелагиали здесь было поймано 718 экз.емпляров молоди и взрослых рыб, принадлежавших к 12 видам из 6 семейств. Наибольшее число таксонов было зафиксировано в составе мезопелагического семейства Мусtophidae, где на полигоне было отмечено в общей сложности 7 видов (*Electrona antarctica, Gymnoscopelus braueri, G. opisthopterus, G. nicholsi, Krefftichthys andersoni, Protomyctophum bolini* и *P. choriodon*) (рис. 10), или 58% от общего числа пойманных видов. Каждое из 5 прочих семейств, отмеченных

Scopelarchidae, Paralepididae, Macrouridae) были представлены в сборах лишь одним видом (см. табл. 2). Величины уловов на станциях в районе бассейна Пауэлла и окаймляющих его северную часть глубоководных желобов и подводных поднятий варьировали от 41.8 (ст. 7362) до 123.5 (ст. 7385) экз./100 м² (рис. 11). Все результативные траления были выполнены ловами от 634–0 до 2143–0 м. При этом необходимо отметить, что в

в глубоководных частях бассейна Пауэлла и при-

легающих водах (Bathylagidae, Gonostomatidae,

КОБЫЛЯНСКИЙ и др.

Номер станции	6601	6607	6617	6619	6597	6651	6648	6653	6655	6684	6685	6686
Семейство/вид			•		•	•			•			
Bathylagidae												
Bathylagus antarcticus	22	11	7	23				20	7	3	7	11
Bathydraconidae												
Bathydraco marri												
Racovitzia cf. glacialis							1					
Channichthyidae												
Cryodraco antarcticus												
Chaenodroco rastrospinosus												
Champsocephalus gunnari						6	1					
Gonostomatidae												
Cyclothone microdon	9	7	4	2				13	6	3	12	1
Liparidae												
Paraliparis cf. gracilis							2					
Paraliparis sp.												
Macrouridae												
Cynomacrurus pirei	1							1				
Macrouridae gen. sp.												
Myctophidae												
Electrona antarctica	13	5	4	11	5	3		4	11	7	8	9
Gymnoscopelus braueri	4				1					1	4	1
G. nicholsi					2							
G. opisthopterus	3	1	4	2				3	2	8	1	1
Gymnoscopelus sp.												
Krefftichthys andersoni												
Protomyctophum bolini											2	
P. choriodon										1		
Protomyctophum sp.												
Notothenidae												
Pleuragramma antarctica							15					
Paralepididae												
Notolepis coatsorum		4										
Scopelarchidae												
Benthalbella elongata					1				1			

Таблица 2. Число экземпляров молоди и взрослых рыб в уловах РТАКСА 79 и 87 рейсах НИС "Академик Мстислав Келдыш" в январе—феврале 2020 и 2022 г.

668

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА

Таблица 2. Окончание

Номер станции	6687	6688	6690	7300	7302	7331	7344	7358	7362	7367	7378	7383	7385
Семейство/вид		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	I
Bathylagidae													
Bathylagus antarcticus	1	15	21						10	20	10	17	7
Bathydraconidae													
Bathydraco marri													
Racovitzia cf. glacialis													
Channichthyidae													
Cryodraco antarcticus					1								
Chaenodroco rastrospinosus						3							
Champsocephalus gunnari													
Gonostomatidae													
Cyclothone microdon	1	15	6						3	4	6	6	5
Liparidae													
Paraliparis cf. gracilis													
Paraliparis sp.						5							
Macrouridae													
Cynomacrurus pirei													
Macrouridae gen. sp.											1		
Myctophidae													
Electrona antarctica	11	16	14	16	21	1	24	10	3		25	21	28
Gymnoscopelus braueri	10	8	3	3	3		4	3	2	1	4	7	14
G. nicholsi	2	1			1							1	
G. opisthopterus	1	11	1					2	3	2	1	2	1
Gymnoscopelus sp.												2	
Krefftichthys andersoni								1				1	3
Protomyctophum bolini		1											
P. choriodon													
Protomyctophum sp.								1					
Notothenidae													
Pleuragramma antarctica						26							
Paralepididae													
Notolepis coatsorum				2			1		1	13	17	10	7
Scopelarchidae													
Benthalbella elongata													



Рис. 9. MDS-диаграмма с результатами ординации станций на основе видового состава и численности глубоководных рыб, пойманных РТАКСА районе работ в 79 и 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" летом 2020 и 2022 гг.: овалами обозначены основные ихтиоцены мезо- и батипелагиали, выделяемые на уровне сходства 10%; 2D-стресс – 0.1; ост. обозначения см. на рис. 8.

уловах 2-х мелководных тралений, выполненных на глубинах 305–0 (ст. 6601) и 120–0 м (ст. 6614) (см. табл. 1) молодь и взрослые рыбы отсутствовали вообще. Численность глубоководных рыб, пойманных на станциях в центральной глубоководной котловине бассейна Пауэлла, а также вблизи западного и восточного ее склонов (ст. 6607, 6617, 6619, 6653, 6655, 7362, 7367) составила 41.8– 84.4 (в среднем 63.5) экз./100 м², тогда как в траловых уловах на станциях, расположенных в северной части круговорота Уэдделла, над глубоко-



Рис. 10. Соотношение доминирующих по численности таксонов пелагических рыб в уловах РТАКСА районе работ в 79 и 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" летом 2020 и 2022 г., в выделенных на основе кластерного анализа группах проб из различных районов исследованной акватории. Обозначения районов как на рис. 11. (1 - Bathylagus antarcticus; 2 - Electrona antarctica; 3 - Notolepis coatsorum; 4 - Gymnoscopelusbraueri; 5 - G. opisthopterus; 6 - Pleuragramma antarctica;7 - Cyclothone microdon; 8 - Champsocephalus gunnari;9 - Прочие).

водными желобами и подводными поднятиями (ст. 6601, 6684, 6685, 6686, 6687, 6688, 6690, 7378, 7383, 7385) их численность была заметно выше и варьировала между 49.4 и 123.5 экз./100 м². в среднем составив 84.1 экз./100 м². Данные 2022 г. по биомассе глубоководных рыб из уловов РТАКСА в бассейна Пауэлла и сопредельных вод показали ее варьирование на полигоне между 369.3 (ст. 7378) и 942.1 (ст. 7383) г/100 м² (в среднем она была равна 684.7 г/100 м²). Существенных различий в значениях биомассы глубоководных рыб в различных частях данного полигона обнаружено не было. Наиболее многочисленными в уловах были два мезопелагических вида – Electrona antarctica (Myctophidae) и Bathylagus antarcticus (Bathylagidae) (рис. 12). Суммарная доля первого и второго вида в уловах РТАКСА летом 2020 и 2022 составляла по численности около 55%, а по биомассе – 53%. Данные виды были встречены практически на всех выполненных станциях, за исключением самых мелководных и/или расположенных в прибрежной шельфовой зоне и имели схожий характер распределения по исследованной акватории.

Группа В — включает в себя все станции из пролива Брансфилда и северо-западной части шельфа и склона Антарктического п-ова. Траловые работы в проливе Брансфилда и сопредельных водах были проведены летом 2020 и 2022 г. на 5 станциях, охватывающих глубины лова между 400-0 и 1160-0 м. Всего здесь было поймано 119 экз. рыб 10 видов из 4-х семейств. Наибольшим числом таксонов на полигоне были представлены светящиеся анчоусы (Myctophidae), к которым относились 6 видов, или 60% от общего числа видов в уловах, тогда как пойманные экземпляры всех прочих семейств принадлежали к 1 (Paralepididae, Bathylagidae) или 2 видам (Channichthyidae); их суммарная доля в уловах составляла на полигоне 40%. Величины уловов глубоководных рыб в районе пролива Брансфилда изменялись на разных станциях от 13.0 (ст. 6597) до



Рис. 11. Распределение общей численности пелагических рыб по результатам ловов РТАКСА на разных полигонах работ в 79 и 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" (цветом показаны районы, выделенные на основе кластерного анализа видового состава улов: • -A, • -B, • -C, • -D, цифры – численность: 1 - 10 экз./100 м², 2 - 50 экз./100 м², 3 - 100 экз./100 м²).

87.5 экз./100 м² (ст. 7358) (см. рис. 11), причем на горизонтах траления 440-550-0 м численность рыб в уловах была несколько меньше нежели на более глубоководных горизонтах 1160-1000-0 м, составляя соответственно 13.0-33.8 (в среднем 21.4) и 46.2-87.5 (в среднем 66.9) экз./100 м². Имеющиеся данные 2022 г. по биомассе глубоководных рыб из уловов РТАКСА на данном полигоне также показали схожие тенденции: в мелководных тралах, охватывающих горизонты 440-550-0 м, биомасса улова составляла 131.5-386.7 г/100 м², а в глубоководных, облавливающих горизонты 1160-1000-0 м - 455.6-1703.0 г/100 м². Наиболее часто встречающимися видами глубоководных рыб в траловых уловах группы В были два вида светящихся анчоусов – Electrona antarctica и Gymnoscopelus braueri, присутствовавшие на этом полигоне в каждой из отобранных проб. Численность этих видов составляла соответственно 8.2-35.2 (в среднем 22.0) и 1.6-7.5 (в среднем 4.4) экз./100 м².

В группу С вошли траловые сборы 2020 и 2022 г., сделанные в Антарктическом проливе, отделяющем о-ва Жуэнвиль от северо-восточной оконечности Антарктического полуострова, на 2 станциях (ст. 6648 и 7331) с горизонтами траления 650–0 и 590–0 м. Видовой состав рыб в уловах был несколько беднее, нежели в проливе Брансфилда. Всего здесь было поймано 55 экз. молоди и взрослых рыб 7 видов из 5 семейств, причем собственно мезопелагические рыбы в уловах практически отсутствовали и были представлены лишь 1 экз. *Electrona antarctica* (Мусtophidae). Все прочие рыбы из уловов (86%) относились к видам, эндемичным для антарктических вод, из семейств Bathydraconidae, Channichthyidae, и Nototheniidae, или высоко специализированным видам (сем. Liparidae), хорошо приспособленным к условиям существования при низких и даже отрицательных температурах. Уловы глубоководных рыб в Антарктическом проливе варьировали между 32.3 и 64.8 экз./100 м², а биомасса на единственной станции, где были проведены измерения (ст.7331) равнялась 2120.6 г/100 м². Доминирующее положение в уловах в Антарктическом проливе занимала антарктическая серебрянка — *Pleuragramma antarcticum* (Nototheniidae), доля которой по численности и биомассе составляла соответственно 72—79 и 78%.

В группу D выделилась единственная проба (ст. 6651), сделанная на относительно мелководном шельфе западной части бассейна Пауэлла на глубинах 505-0 м. Улов пойманных рыб в ней был очень скудным как по видовому составу, так и по численности. Всего на станции было поймано 9 экз. рыб, относящихся к 2 видам из 2 семейств: щуковидная белокровка Champsocephalus gunnari (Channichthvidae) и антарктическая электрона Electrona antarctica (Myctophidae). Причем лишь последний вид может быть отнесен к собственно мезопелагическим видам. Общая численность рыб в улове равнялась 14.3 экз./100 м², из которых 67% приходилось на Champsocephalus gunnari. Изначально кажется, что рассматриваемая станция должна быть отнесена, скорее, к группе В (по местоположению, наличию миктофид и отсутствию циклотон и батилагов). Но малое число видов (всего 2) и доминирование щуковидной белокровки заставили алгоритм программы поместить ее в отдельный кластер, поддерживаемый статистически значимыми различиями.



Рис. 12. Распределение антарктической электроны *Electrona antarctica* (a) и батилага *Bathylagus antarcticus* (б). (1 - 0, 2 - 10, 3 - 20, 4 - 50 экз/100 м²).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты обработки наших материалов показывают, что пелагические ихтиоцены в водах к югу от южной границы Антарктического циркумполярного течения и фронта Скотия, разделяющих воды морей Скотия и Уэдделла, представляют собой довольно бедные по биоразнообразию, но зачастую многочисленные (за счет высокой численности и биомассы доминирующих видов) сообщества, как относительно мелководных, эндемичных для шельфа и склона Антарктиды представителей семейств Bathydraconidae, Channichthyidae, Liparidae, Nototheniidae, так и более глубоководных мезо- и батипелагических рыб, по большей части состояших из видов сем. Mvcthophidae, Bathylagidae, Gonostomatidae, Paralepididae и Scopelarchidae. Их местообитания, главным образом, были локализованы в толще вод над морскими желобами и глубоководными котловинами северной части моря Уэдделла. Полученные данные хорошо согласуются и с исследованиями пелагической антарктической ихтиофауны предыдущих авторов [9, 19, 42, 47]. Изучение таксономического состава, численности, а также характера горизонтального и вертикального распределения сообществ пелагических рыб на разных полигонах акватории, где выполнялись работы, на наш взгляд, показывает их тесную связь с гидрофизическими характеристиками и структурой водных масс, присутствующих на данных полигонах. Действительно, глубоководные сообщества мезо- и батипелагических рыб, отмеченные главным образом в центральной абиссальной котловине и окружающей периферии бассейна Пауэлла, а также отчасти в глубоководной части пролива Брансфилда, в летнее время, по-видимому, тесно связаны со слоем теплой (0-0.6°С, 34.6 psu) глубинной воды (WDW), занимающим горизонты примерно от 300 до 1500-1700 м. При этом максимальной своей численности мезо- батипелагические рыбы, видимо, достигают на горизонтах ниже 400 м; в вышележащих горизонтах присутствуют лишь личиночные их стадии, а молодь и половозрелые экз.емпляры, судя по нашим данным,

здесь очень немногочисленны, или отсутствовали вообше. Естественным лимитирующим фактором окружающей среды в бассейне Пауэлла и глубоководных частях пролива Брансфилда, препятствующим проникновению мезо- и батипелагических рыб в более мелководные горизонты, служит наличие здесь переохлажденного, образующегося в результате зимней конвекции, вышележащего слоя вод толщиной 200-300 м, с отрицательной температурой -1.5...-2°С и относительно низкой соленостью 33.2-34.4 psu. Глубоководные рыбы, возможно, избегают вод с подобными характеристиками, и/или заносятся в них лишь случайным образом. В верхнем слое толщиной 20-100 м, занимаемом теплой и относительно распресненной Антарктической поверхностной водой (AASW), образующейся при летнем нагреве, присутствуют лишь немногочисленные личинки мезопелагических рыб, главным образом сем. Paralepididae [1]. По мере продвижения в пределах бассейна Пауэлла с юга на север в район хребта Саут-Скотия и глубоководных желобов, служащих естественной границей, разделяющей воды морей Уэдделла и Скотия, видовой состав и численность глубоководных сообществ рыб становится несколько выше. На станциях вблизи северной границы бассейна Пауэлла число пойманных видов и средняя численность мезо- батипелагических рыб оказались выше, чем на станциях над его центральной частью, западным и восточным склонами (соответственно в среднем 11, против 7 видов и 63.5, против 84.1 экз./100 м²). Кроме того, на станциях в центральной части бассейна в уловах заметно доминировал Bathylagus antarcticus (в среднем 40 против 24% от всего числа рыб в улове, или 28.8, против 20.2 экз./100 м²), а численность Electrona antarctica, напротив, была заметно меньше (в среднем 25, против 33% или 12.9, против 27.4 экз./100 м²). В сборах на склонах и в центральной части бассейна Пауэлла также отсутствовали такие виды мезо- батипелагических рыб, как Gymnoscopelus nicholsi, Krefftichthys andersoni, Protomyctophum choriodon, Protomyctophum bolini и Benthalbella elongata. Согласно полученным ранее данным, наибольшие величины первичной продукции, биомассы и видового состава, фито- и зоопланктона наблюдались на северной периферии бассейна Пауэлла, а минимальные – в области его абиссальной котловины. Высокая численность и разнообразие сообществ зоопланктона в этом районе, превосходящая таковую в других исследованных районах в 5–10 раз, свидетельствует о том, что эта акватория служит важной областью для нагула различных антарктических планктоноядных видов – от рыб до китов [1]. Повышенное биоразнообразие сообществ глубоководных рыб вдоль северной границы моря Уэдделла может быть также обусловлено и тем, что лишь меньшая часть мезо- и батипелагических

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

видов рыб, таких, как например, *Electrona antarc*tica, Bathylagus antarcticus, Notolepis coatsorum полностью проходит в море Уэдделла свой жизненный цикл, тогда как большинство из отмеченных здесь видов существуют только как экспатрианты в антарктические воды, которые для них, в этом случае, можно рассматривать, как зону стерильного выноса, где взрослые особи не могут провести икрометание, а икра и личинки пройти процесс развития и метаморфоза [9, 11, 37, 39]. Подобные виды обычно не достигают высокой численности, поскольку подпитка местной популяции осуществляется лишь за счет внесения извне молоди или половозрелых особей. По мере приближения к границам, разделяющим воды различного генезиса, число подобных видов-экспатриантов должно vвеличиваться, а их роль в экосистеме возрастать. Судя по результатам наших исследований, рыбные сообщества, отмеченные в Антарктическом проливе и на относительно мелководном шельфе Антарктического п-ова, по своему таксономическому составу и численности кардинально отличаются от таковых из более глубоководных областей исследованной акватории. Они, по-видимому, также определяются гидрофизическими параметрами среды и структурой водных масс, занимающих эти области моря. На наш взгляд, наличие в данных районах в летний период южного полушария переохлажденных вод с отрицательными температурами (-1.5...-2°С) и относительно низкой соленостью (33.2-34.4 psu), занимающих практически все пространство от поверхности до дна, главным образом, и служит причиной преобладания в пелагиали тех видов, которые в процессе эволюции антарктической ихтиофауны выработали адаптивные приспособления к подобным условиям существования. Это, прежде всего, различные вилы белокровных шук (Channichthyidae). антарктических плосконосов (Bathydraconidae), нототений (Nototheniidae) и морских слизней (Liparidae). Некоторые виды из этих семейств, например, антарктическая серебрянка *Pleuragramma* antarcticum, могут занимать в ихтиоценах доминирующее положение и достигать в уловах относительно высокой численности [33], в то время, как более глубоководные представители "истинно" мезопелагической ихтиофауны появляются в них лишь спорадически, в виде единичных экземпляров.

выводы

1. В летний период 2020 и 2022 гг. в проливе Брансфилда, Антарктическом проливе, а также в шельфовых и глубоководных частях бассейна Пауэлла, были отмечено 19 видов молоди и взрослых пелагических рыб, относящихся к 10 семействам. 2. Анализ численности и биоразнообразия глубоководной пелагической ихтиофауны, позволили выявить на изученной акватории 4 основных ихтиоцена (А, В, С и D), поддерживаемые статистически значимыми различиями и приуроченные соответственно к глубоководным районам бассейна Пауэлла, проливу Брансфилда и северозападной части шельфа и склона Антарктического п-ова, к Антарктическому проливу, а также к глубоководному шельфу западной части бассейна Пауэлла.

3. Глубоководные пелагические ихтиоцены в водах к югу от южной границы Антарктического циркумполярного течения и фронта Скотия, представляют собой довольно бедные по биоразнообразию, но зачастую многочисленные (за счет высокой численности и биомассы доминирующих видов) сообщества, как относительно мелководных, эндемичных для шельфа и склона Антарктиды представителей семейств Bathydraconidae, Channichthyidae, Liparidae, Nototheniidae, так и более глубоководных мезо- и батипелагических рыб, по большей части состоящих из видов сем. Mycthophidae, Bathylagidae, Gonostomatidae, Paralepididae и Scopelarchidae.

4. Изучение таксономического состава, численности, а также характера горизонтального и вертикального распределения выделенных сообществ пелагических рыб на разных полигонах акватории, где выполнялись работы, показало их тесную связь с гидрофизическими характеристиками и структурой водных масс, присутствующих на данных полигонах.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Полухин А.А. и др. Мезомасштабная изменчивость океана в северной части моря Уэдделла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 663–679. https://doi.org/10.31857/S0030157420050184
- 2. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс НИС "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825.

https://doi.org/10.31857/S0030157420050172

- Anderson M.E. The Origin and Evolution of the Antarctic Ichthyofauna // Fishes of the Southern Ocean. Grahamstown: J.L.B. Smith Institute of Ichthyology. Gon O., Heemstra P.C. (eds.). 1990. P. 28–33.
- 4. *Andriashev A.P.* A general review of the Antarctic fish fauna // Biogeography and ecology of Antarctica. The Hague: Junk Publisher. 1965. P. 491–550.

- Carmack E.C., Foster T.D. On the flow of water out of the Weddell Sea // Deep-Sea Res. 1975. V. 22. P. 711–724. https://doi.org/10.1016/0011-7471(75)90077-7
- Catalán I.A., Morales-Nin B., Company J.B. et al. Environmental influences on zooplankton and micronekton distribution in the Bransfield Strait and adjacent waters //Polar Biology. 2008. V. 31. P. 691–707. https://doi.org/10.1007/s00300-008-0408-1
- Chunlin L., Chi Z., Yang L. et al. Age and growth of Antarctic deep-sea smelt (Bathylagus antarcticus), an important mesopelagic fish in the Southern Ocean // Deep-Sea Res. Part II. 2022. V. 201. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2022.105122
- Clarke K.R., Warwick R.M. 2005. Primer-6 computer program // Natural Environment Research Council. Plymouth. 2005. (http://refhub.elsevier.com/S0079-6611(16)30145-8/h0110 01/11/2020).
- 9. Collins M.A., Stowasser G., Fielding S. et al. Latitudinal and bathymetric patterns in the distribution and abundance of mesopelagic fish in the Scotia Sea // Deep-Sea Res. Part II. 2012. V.59. P. 189–198. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.07.003
- 10. *De Broyer C., Koubbi P., Griffihs H.J. et al.* (eds.), Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientifc Committee on Antarctic Research, Cambridge 2014.XII + 498 pp.
- Dewitt H.H., Heemstra P.C., Gon O. Nototheniidae // Fishes of the Southern Ocean. Grahamstown: J.L.B. Smith Institute of Ichthyology. Gon O., Heemstra P.C. (eds.). 1990. P. 279–331.
- Donnelly J., Sutton T.T., Torres J.J. Distribution and abundance of micronekton and macrozooplankton in the NW Weddell Sea: relation to a spring ice-edge bloom // Polar Biol. 2006. V. 29. P. 280–293. https://doi.org/10.1007/s00300-005-0051-z
- 13. Donnelly J., Torres J.J. Pelagic fishes in the Marguerite Bay region of the West Antarctic Peninsula continental shelf // Deep-Sea Res. Part II. 2008. V. 55. P. 523–539. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.11.015
- 14. *Eastman J. T.* The nature of the diversity of Antarctic fishes // Polar Biol. 2005. V. 28. P. 93–107. https://doi.org/10.1007/s00300-004-0667-4
- Gjøsaeter J., Kawaguchi K. A review of the world resources of mesopelagic fish // FAO Fish. Tech. Pap. 1980. № 193. 151 p.
- Greely T.M., Gartner Jr J.V., Torres J.J. Age and growth of *Electrona antarctica* (Pisces: Myctophidae) the dominant mesopelagic fish of the Southern Ocean // Marine Biol. 1999. V. 133. P. 145–158. https://doi.org/10.1007/s002270050453
- 17. *Hempel G.* Antarctic marine food webs // Antarctic Nutrient Cycles. Berlin: Springer. 1985. P. 266–276.
- Hopkins T.L., Torres J.J. Midwater food web in the vicinity of a marginal ice zone in the western Weddell Sea // Deep Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers. 1989. V. 36. Is. 4. P. 543–560. https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90005-8
- Hulley P.A. Results of the research cruises of FRV "Walther Herwig" to South America. 58. Family Myctophidae (Osteichthyes, Myctophiformes) // Arch. Fischereiwiss. 1981. V. 31. P. 1–300.

- Huneke W.G., Huhn O., Schroeder M. Water masses in the Bransfield Strait and adjacent seas, austral summer 2013 // Polar Biol. 2016. V. 39. P. 789–798. https://doi.org/10.1007/s00300-016-1936-8
- Jones C.D., Koubbi P., Catalano B. et al. Mesopelagic and larval fish survey // NOAA Technical Memorandum NMFS SWFSC. 2014. V. 524. P. 28–40.
- Kennett J.P. Paleoceanographic and biogeographic evolution of the Southern Ocean during the Cenozoic, and Cenozoic microfossil datums // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 1980. V. 31. P. 123–152. https://doi.org/10.1016/0031-0182(80)90017-6
- Kellermann A., Kock K. H. Patterns of spatial and temporal distribution and their variation in early life stages of Antarctic fish in the Antarctic Peninsula region // In: Antarctic Ocean and resources variability. Springer Berlin Heidelberg. 1988. P. 147–159.
- 24. *Kellermann A., Schadwinkel S.* Winter aspects of the ichthyoplankton community in Antarctic Peninsula waters //Polar Biol. 1991. V. 11. P. 117–127.
- 25. *Kock K.H.* Antarctic fish. Key environments // Oxford: Pergamon Press. 1985. P. 173–192.
- Kock, K. H. Antarctic fish and fisheries // Cambridge University Press. 1992. 359 p.
- 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. 2021. V. 496. Pt. 1. P. 92–95. https://doi.org/10.1134/S1028334X21010116
- Kruskal J.B. Wish M. Multidimensional scaling (Quantitative Application in the Social Sciences). Beverly Hills: Sage Univ. Press. 1978. 96 p.
- 29. Lancraft T.M., Torres J.J., Hopkins T.L. Micronekton and macrozooplankton in the open waters near Antarctic Ice Edge Zones (AMERIEZ 1983 and 1986) // Polar Biology. 1989. V. 9, № 4. P. 225–233. https://doi.org/10.1007/BF00263770
- Lancraft T.M., Hopkins T.L., Torres J., Donnelly J. Oceanic micronektonic/macrozooplanktonic community structure and feeding in ice covered Antarctic waters during the winter (AMERIEZ 1988) // Polar Biology. 1991. V. 11. P. 157–167. https://doi.org/10.1007/BF00240204
- 31. *Morozov E. G., Krechik V. A., Frey D. I. et al.* Frontal Zone Between Relatively Warm and Cold Waters in the Northern Weddell Sea // Antarctic Peninsula Region of
- horthern weddell Sea // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer Nature. 2021. P. 31–53. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_3
- 32. Murphy E.J., Watkins J.L., Trathan P.N. et al. Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web // Phil. Trans. R. Soc. B. 2007. V. 362. P. 113–148. https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1957
- 33. O'Driscolla R.L., Macaulaya G.J., Gauthier S. et al. Distribution, abundance and acoustic properties of Antarctic silverfish (*Pleuragramma antarcticum*) in the Ross Sea // Deep Sea Res. II. 2011. V.58. P. 181–195. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.05.018
- 34. Orsi A. H., Nowlin W. D., Whitworth III T. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // Deep-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

Sea Res. I. 1993. V. 40. P. 169–203. https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90060-G

 Parker M. L., Fraser W. R., Ashford J. et al. Assemblages of micronektonic fishes and invertebrates in a gradient of regional warming along the Western Antarctic Peninsula // Journal of Marine Systems. 2015. V. 152. P. 18–41.

https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.07.005

- 36. *Piatkowski U., White M., Dimmler W.* Micronekton of the Weddell Sea: distribution and abundance // Berichte zur Polarforschung. Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung. 1990. S. 73–81.
- Piatkowski U., Rodhouse P.G., White M.G. et al. Nekton community of the Scotia Sea as sampled by the RMT 25 during austral summer // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1994. V. 112. P. 13–28. https://doi.org/10.3354/meps112013
- Planetcalc. Каталог онлайн калькуляторов. (https://planetcalc. Version 3.0.4170.0. 11/2022)
- Pusch C., Hulley P.A., Kock K.H. Community structure and feeding ecology of mesopelagic fishes in the slope waters of King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) // Deep-Sea Res. I. 2004. V. 51. P. 1685– 1708.
- Rembiszewski J.M., Krzeptowski M., T.B. Linkowski T.B. Fishes (Pisces) as by-catch in fisheries for krill *Euphau-sia superba* Dana (Euphausiacea, Crustacea) // Pol. Arch. Hydrobiol. 1978. V. 25. P. 677–693.
- 41. *Romesburg H.C.* 2004. Cluster analysis for researchers // Morrisville, NC: Lulu.com. (Reprint of 1984 edition, with minor revisions.). 334 p.
- 42. Saunders R.A., Collins M.A., Stowasser G., Tarling G.A. Southern Ocean mesopelagic fish communities in the Scotia Sea are sustained by mass immigration // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2017. V.569. P. 173–185. https://doi.org/10.3354/meps12093
- 43. *Skóra K. E., Sosiński J.* Observations on the ichthyofauna distribution in the regions of the Scotia Sea and Antarctic Peninsula //Polish Polar Research. 1983. V. 4. № 1–4. P. 49–55.
- 44. *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. V. 8. P. 333–336.
- 45. *Vacchi M., Pisano E., Ghigliotti L.* (eds.). The Antarctic silverfish: a keystone species in a changing ecosystem. Cham: Springer International Publishing. 2017. 314 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55893-6
- 46. Wenneck T.de L., Falkenhaug T., Bergstad O.A. Strategies, methods, and technologies adopted on the R.V. G.O. Sars MAR-ECO expedition to the Mid- Atlantic Ridge in 2004 // Deep-Sea Res. II. 2008. V. 55. P. 6–28. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.09.017
- White M.G., Piatkowski U. Abundance, horizontal and vertical distribution of fish in eastern Weddell Sea micronekton // Polar Biol. 1993. V. 13. P. 41–53. https://doi.org/10.1007/BF00236582
- 48. Wikipedia. Grtat-circle distance (https://en.wikipedia. org/w/index.php?title=Great-circle_dist.

Spatial Structure of Deep-Sea Pelagian Ichthiocenes in the Northern Weddell Sea (Powell Basin) and Brunsfield Strait in the Summer 2020 and 2022

S. G. Kobyliansky^{a, #}, A. V. Mishin^a, A. M. Orlov^{a, b, c}, N. V. Gordeeva^{a, d}, R. Z. Mukhametyanov^a

^aShirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bA.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^cTomsk State University, Tomsk, Russia

^dVavilov Institute of General Genetics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: kobylianskysg@gmail.com

A review of the composition and structure of deep-sea pelagic ichthyocenes in the Bransfield Strait and the northern part of the Weddell Sea (Powell Basin) in the Atlantic sector of the Southern Ocean is presented. The material was received in the summer of 2020 and 2022 at 26 stations at the layers from 120–0 to 2200–0 m. 901 specimens of juveniles and adult fishes belonging to 19 species from 10 families were collected. Statistical analysis made it possible to identify 4 significantly different regions, in which the dominant ichthyocenes were located in waters of different origin. These ichthyocenes are poor in the number of identified species, but often quite numerous. Relatively shallow-water representatives of the families Bathydraconidae, Channichthyidae, Liparidae, Nototheniidae, endemic to the shelf and slope of Antarctica, dominated in the area of the Antarctic Strait and on the shelf of the Antarctic Peninsula, while in the Bransfield Strait, the abyssal basin of the Powell Basin, as well as in the pelagic zone above deep-sea ridges and trenches, bordering it from the north are meso- and bathypelagic fish from the families Mycthophidae, Bathylagidae, Gonostomatidae, Paralepididae and Scopelarchidae. Near the northern boundary of the Powell Basin, the number of caught mesobatypelagic species and their average abundance were higher than in its central part (11 vs. 7 species and 63.5 vs. 84.1 ind./100 m²). In the central part of the basin, *Bathylagus antarcticus* dominated, with an average share of 40% in catches and 28.8 ind./100 m², while in its northern part *Electrona antarctica* dominated, with an average share of 33% in -27.4 ind./100 m².

Keywords: biodiversity, structure and abundance of pelagic Ichthyocenes, Antarctical waters, Weddell Sea, mesopelagic zone, bathypelagic zone, hydrophysical structure of sea waters

———— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УЛК 599.51/.53/.745

ВСТРЕЧАЕМОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИНВАЛОВ (BALAENOPTERA PHYSALUS) И ГОРБАЧЕЙ (MEGAPTERA NOVAEANGLIAE) В АТЛАНТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ АНТАРКТИКИ

© 2023 г. А. Д. Чернецкий^{1,} *, П. В. Чукмасов², В. В. Краснова¹, А. В. Третьяков², Л. Г. Третьякова², Д. Г. Битютский³, С. А. Мошаров¹, П. А. Салюк⁴

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва. Россия ²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия ³Керченский отдел Азово-Черноморского филиала ФГБНУ "ВНИРО" ("АзНИИРХ"), Керчь, Россия ⁴Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: adcher@ocean.ru Поступила в релакцию 28.11.2022 г. После доработки 08.02.2023 г. Принята к публикации 16.02.2023 г.

Исследовались встречаемость и распределение финвалов и горбачей по маршруту следования НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Атлантическом секторе Антарктики в январе-феврале 2022 г. Рассматривались особенности распределения китов в зависимости от глубины акватории, концентрации и половозрелости антарктического криля, содержания хлорофилла "а" в воде. Самая высокая встречаемость финвалов была обнаружена в глубоководных районах бассейна Пауэлла и Оркнейского желоба, где было зарегистрировано преобладание взрослого криля, а горбатых китов в мелководном проливе Брансфилда, где преобладала молодь антарктического криля. Зависимость встречаемости китов от концентрации хлорофилла "а" не подтвердилась.

Ключевые слова: Атлантический сектор Антарктики, китообразные, финвалы, горбатые киты, встречаемость, пространственное распределение DOI: 10.31857/S0030157423040032, EDN: YIFZZW

ВВЕДЕНИЕ

Южный океан является высокопродуктивной морской экосистемой, важное место в которой занимают китообразные, особенно усатые киты [4, 10, 29, 33, 44]. Наибольшая численность усатых китов в Антарктике наблюдается в январеапреле в период нагула, но время их прибытия в регион имеет видовую специфику [23]. Киты демонстрируют различные модели пространственного распределения [40], которые зависят не только от параметров окружающей среды, таких как течения, лед, батиметрия, океанография [4, 10, 42], но и от наличия и доступности пищи [14, 27, 32, 37]. За немногими исключениями главным объектом питания практически всех усатых китов признан антарктический криль *Euphausia superba* [15, 22]. Именно Атлантический сектор Южного океана является районом, где обнаруживаются самые крупные скопления криля [2, 3]. В последнее время наблюдается увеличение численности китов, кормящихся крилем у Антарктического полуострова [30]. Считается, что репродуктивный успех китов во многом зависит от обилия кормовых объектов в окружающей среде, поэтому они могут быть индикаторами состояния морских ресурсов [29].

В настоящее время Южный океан подвергается различным природным и антропогенным факторам воздействия. Изменение климата, вызванное высокими темпами потепления [8, 9, 24], увеличение промысловой добычи криля [28] и возрастающая туристическая активность [43] могут негативно сказываться на морской экосистеме Антарктики. В связи с чем этот регион и его обитатели, такие как усатые киты, все больше привлекают к себе внимание исследователей, а комплексный подход в его изучении становится приоритетным [1, 25].

В январе и феврале 2022 года в 87 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Антарктике в ходе реализации "Комплексной экспедиционной программы выполнения ресурсных исследований криля и исследований экосистемы Южного океана (Атлантический сектор Антарктики)" проводились наблюдения за морскими млекопитающими по маршруту следования суд-

	1 1 1 5			
	Район наблюдений	Характеристика глубин	Дата наблюдений	Продолжительность наблюдений
1	Пролив Брансфилда и акватория к востоку от него до линии о. Мордвинова–о. Жуэнвиль	Шельфовая зона и впадина глубиной до 3000 м	21.01–27.01; 31.01–1.02; 14.02	150 ч 55 мин
2	Пролив Антарктик	До 1000 м	27.01-28.01	17 ч 50 мин
3	Море Уэдделла, северо-западная часть к востоку от п-ова Тринити до 53° з.д.	Шельфовая зона с глубинами около 400 м	28.01-29.01	27 ч 10 мин
4	Бассейн Пауэлла	Более 3000 м и ограни- чивающая его мелковод- ная часть с глубинами около 500 м	19.01–20.01; 30.01–31.01; 2.02–7.02; 13.02	128 ч 15 мин
5	Оркнейский шельф	Шельфовая зона с глубинами около 300 м	8.02	15 ч 35 мин
6	Оркнейский желоб	До 6000 м	9.02-12.02	65 ч 30 мин
7	Море Скотия, южная часть	Более 4000 м	18.01; 15.02	18 ч 20 мин

Таблица 1. Характеристика районов работ и продолжительность визуальных наблюдений за антарктическими китообразными на маршруте следования судна "Академик Мстислав Келдыш" в январе-феврале 2022 г.

на. Результаты этих наблюдений показали разницу в распределении некоторых видов китообразных, а именно финвалов (*Balaenoptera physalus*) и горбатых китов (*Megaptera novaeangliae*), что и послужило поводом для дальнейшего анализа обнаруженных различий, являющегося целью данной работы.

Необходимо отметить, что исследования усатых китов крайне важны, так как многие из них пострадали во время интенсивного китобойного промысла в XX веке, после которого до сих пор не восстановились и находятся под угрозой исчезновения. Так, например, финвалы в водах Антарктики (внесены в Красную Книгу IUCN в категории VN – "Уязвимые") в последние годы хотя и показывают тенденцию к восстановлению, но их численность все еще остается значительно ниже того уровня, которая была у них до начала промысла [19]. Полученная информация о современном распространении морских млекопитающих имеет решающее значение для понимания их роли в экосистеме этого региона [11].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Визуальные наблюдения за китообразным. Судовые наблюдения за китообразными в Атлантическом секторе Антарктики проводились на маршруте следования НИС "Академик Мстислав Келдыш" с 18 января по 15 февраля 2022 г. Наблюдения велись в светлое время суток двумя специалистами, одновременно с левого и правого бортов в секторе 180° по ходу судна с пеленгаторной палубы, расположенной на высоте 17 м над уровнем моря. При ухудшении погодных условий наблюдения не прекращались и продолжались из ходовой рубки или с крыльев мостика (14 м над уровнем моря). Работы приостанавливались при ветре более 5 баллов по шкале Бофорта и видимости менее 50 м. Время наблюдений было разбито на четырехчасовые вахты, соответствующие судовым. В период работ на океанологических станциях или нахождения судна в дрейфе, исследования велись одним специалистом. Наблюдатели были оснащены скоростными фотоаппаратами с длиннофокусными объективами и биноклями. Каждая встреча с китообразными отмечалась точкой на портативном GPS-навигаторе. Расстояние ло китов определяли визуально или по углу между объектом наблюдений и горизонтом [20]. Угол определялся с помощью бинокля с ретикулярной сеткой или измерялся впоследствии по фотографиям. Известные расстояние до животного и пеленг на него позволяли получить координаты его местонахождения в момент наблюдения для последующей обработки и картирования. Общее время наблюдений составило 423 ч 35 мин. Учитывая физико-географические характеристики, маршрут наблюдений был разбит на несколько районов (табл. 1, рис. 1).

Оценка встречаемости финвалов и горбачей в районе исследований. Для оценки встречаемости китообразных район исследований был поделен на участки, в проекции Меркатора имеющие вид



Рис. 1. Районы наблюдений и встречи китообразных в Атлантическом секторе Антарктики в январе – феврале 2022 г. Цифрами показаны районы: 1 – пролив Брансфилда, 2 – пролив Антарктик, 3 – море Уэдделла, 4 – бассейн Пауэлла, 5 – Оркнейский шельф, 6 – Оркнейский желоб, 7 – Море Скотия.

прямоугольников со сторонами 30' по долготе и 15' по широте. Длина стороны такого прямоугольника по меридиану равнялась 27.8 км, а по параллели – варьировала в зависимости от географической широты и составляла, например, 27.8 км на 60° ю.ш. и 24.4 км – на 64° ю.ш. Такие размеры и форма участков, близкая к квадрату, для решения поставленной задачи были признаны оптимальными. Для каждого участка было посчитано количество зарегистрированных финвалов и горбачей, и определена длина пути, пройденного судном. В расчет брались только те отрезки пути, на которых проводились наблюдения за китообразными в светлое время суток и при благоприятной погоде. Общая длина эффективных участков пути составила 3594 км. Для каждого участка была рассчитана встречаемость особей данного вида на 1 км пути.

Оценка встречаемости финвалов и горбачей в зависимости от концентрации и половозрелости криля. Данные о биомассе и половозрелости антарктического криля были получены по результатам 36 ловов сетью Бонго, двойной квадратной

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

сетью (DSN) и тралом РТАКСА, при этом глубина лова варьировала от 130 до 1900 м. Из полученного материала отбирались пробы для промеров и биологического анализа [5]. Для оценки биомассы и численности антарктического криля использовались количественные данные о каждом улове из расчета на единицу объема профильтрованной воды (1000 м³) [39].

Оценка зависимости встречаемости финвалов и горбачей от количества и возраста криля проводилась методом картирования полученных данных с использованием пакета ArcGIS 10.4.1 для дальнейшего их сопоставления по семи районам исследований.

Оценка встречаемости усатых китов в зависимости от концентрации хлорофилла "а". Оценка зависимости встречаемости усатых китов от концентрации хлорофилла "а" (*Chl-a*) проводилась без учета их видовой принадлежности. Поскольку фитопланктон не является непосредственным объектом питания китов, использование данных по встречаемости отдельно по видам было принято нецелесообразным. Кроме того, такой подход позволил значительно увеличить размер выборки за счет неопределенных до вида китов.

Для определения концентрации Chl-а в воде использовались два взаимодополняющих метода: (1) прямое измерение концентрации хлорофилла "а" в воде стандартным экстрактным методом в пробах, полученных на станциях с разных глубинных горизонтов; (2) расчет по лазерно-индуцированной флуоресценции, измеренной с помощью проточного флюориметра по ходу движения судна и калиброванной на стандартные определения в мг/м³. Интегральные по глубине значения Chl-a_{int} в водной толще (мг/м²) экстрактным методом были получены на 29 станциях в проливе Брансфилда и на разрезе через бассейн Пауэлла от о. Сноу-Хилл до Южных Оркнейских островов. Результаты измерений Chl-а по флюоресценции были представлены в виде средней концентрации в мг/м³ для каждого отрезка пути внутри выделенных участков, для которых была рассчитана встречаемость усатых китов. При этом для оценки их встречаемости использовалась не сумма всех длин отрезков пути внутри участка, а отдельно каждый отрезок, что диктовалось необходимостью приведения данных по китам в соответствие с данными по хлорофиллу. В данных по встречаемости не учитывались нулевые значения, т.е. отрезки с отсутствием китов игнорировались.

Влияние концентрации *Chl-a* на встречаемость усатых китов для каждого метода измерения хлорофилла анализировалось независимо. В анализе использовался непараметрического коэффициент корреляции Спирмена (p = 0.05),

Оценка встречаемости усатых китов в зависимости от глубины. Для анализа глубин в точках, где были зарегистрированы встречи с финвалами и горбачами, применялась графическая база данных GEBCO (https://download.gebco.net). Для каждой встречи китов использовались батиметрические данные в соответствии с географическими координатами их расположения.

Поскольку распределение данных в этом исследовании отличалось от нормального, для сравнения встречаемости финвалов и горбачей в зависимости от глубины применялся *U*-критерий Манна—Уитни (p = 0.05). Статистический анализ проводили с использованием статистического пакета Statistica 12 StatSoft Inc.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Видовой и количественный состав китообразных на маршруте следования судна по визуальным наблюдениям. В районе исследования было зарегистрировано 13 видов китообразных (472 встречи/ 966 особей) (табл. 2). Самыми массовыми видами были финвал (51.7% встреч/52.38% особей) и горбач (30.1% встреч/27.23% особей).

Встречаемость финвалов и горбачей по расчетным участкам. Путь судна во время проведения наблюдений проходил через 142 расчетных участка. Количество визуально зарегистрированных финвалов и горбачей для каждого района наблюдений представлено в табл. 3.

Распределение китов в районах наблюдений имело существенные различия.

В проливе Брансфилда преобладали горбачи. Они были встречены на 19 участках из 40 и в основном в центральной части пролива. Финвалы были зарегистрированы лишь на 14 участках из 40 (табл. 3, рис. 2).

В проливе Антарктик также доминировали горбачи. Они зарегистрированы на 4 участках из 5 при встречаемости от 0.075 до 0.1 ос./км, а финвалы только на двух участках (0.027 ос./км).

На северо-западе моря Уэдделла оба вида китов были представлены практически по всему маршруту следования. Горбачи отмечались на 10 расчетных участках из 13 с очень высокой встречаемостью — до 1.2 ос./км. Финвалы отмечены на 7 участках с максимумом встречаемости 1.7 ос./км.

В районе бассейна Пауэлла наблюдалась абсолютно противоположная картина. Было отмечено полное преобладание финвалов (табл. 3). Они были зарегистрированы на 25 расчетных участках из 48, причем в основном в районах с резким перепадом глубин по периферии бассейна. Горбачи были отмечены только на одном участке в северовосточной части бассейна.

В районе Оркнейского желоба, для которого также характерен резкий перепад глубин, преобладали финвалы с высокой встречаемостью до 1.02 ос./км, отмечены на 12 расчетных участках из 15. Горбачи зарегистрированы только на 4 участках.

В мелководном районе к югу от Оркнейских островов киты практически не встречались. Зарегистрировано только 2 горбача на одном участке из 8.

Из 13 расчетных участков в южной части моря Скотия только на 2 было отмечено по одному финвалу (0.036 ос./км) (рис. 2).

Встречаемость китов в зависимости от концентрации и половозрелости криля. В проливе Брансфилда, где преобладали горбачи (табл. 3, рис. 2), была обнаружена самая высокая концентрация неполовозрелого криля (от 31 до 73 г/1000 м³) (рис. 3).

Районы бассейна Пауэлла и Оркнейского желоба характеризуются полным преобладанием финвалов (табл. 3, рис. 2) и взрослого криля (рис. 3).

ВСТРЕЧАЕМОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИНВАЛОВ

Dur	колич	іество	соотношение (%)							
Бид	встреч	особей	встреч	особей						
Инфраотряд Ки	тообразные Се	etacea	1							
П/отряд Уса	гые киты Mystic	ceti								
Семейство Полосатики Balaenopteridae										
Синий кит Balaenoptera musculus	3	4	0.64	0.41						
Финвал Balaenoptera physalus	244	506	51.69	52.38						
Сейвал Balaenoptera borealis	3	6	0.64	0.62						
Горбатый кит Megaptera novaeangliae	142	263	30.08	27.23						
Южный малый полосатик Balaenoptera bonaerensis	3	3	0.64	0.31						
Полосатик н/о, Balaenopteridae sp.	20	34	4.24	3.52						
Семейство Глад	кие киты Balae	enidae								
Южный гладкий кит Eubalaena australis	2	2	0.42	0.21						
Семейство Кл	оворылые Ziph	iidae								
Плосколобый бутылконос Hyperoodon planifrons	2	2	0.42	0.21						
Семейство Дель	финовые Delph	inidae								
Длинноплавниковая гринда Globicephala melas	2	65	0.42	6.73						
Косатка Orcinus orca	2	8	0.42	0.83						
Крестовидный дельфин Lagenorhynchus cruciger	1	6	0.21	0.62						
Кит н/о <i>Cetacea</i> gen. sp.	48	67	10.17	6.94						
ВСЕГО:	472	966	100.00	100.00						

Таблица 2. Видовой состав и количество китообразных, зарегистрированных по маршруту следования судна в Атлантическом секторе Антарктики в январе—феврале 2022 г.

Таблица 3. Количество и встречаемость финвалов и горбачей по районам наблюдений в январе—феврале 2022 г. Для характеристики встречаемости представлены Me — медиана; Min—Max — минимум и максимум; $M \pm CD$ — средняя и стандартное отклонение

Nº		Количество		Финвалы Горбачи								
	Район работ	расчетных	кол-во	BC	гречаемост	гь (ос./км)	кол-во	вс	встречаемость (ос./км)			
		участков (<i>n</i>)	(встречи/ особи)	Me	Min–Max	$M \pm SD$	(встречи/ особи)	Me	Min–Max	$M \pm SD$		
1	Пролив Брансфилда	40	25/45	0	0-0.143	0.025 ± 0.043	76/123	0	0-0.665	0.067 ± 0.122		
2	Пролив Антарктик	5	2/3	0	0-0.028	0.011 ± 0.014	9/21	0.076	0-0.125	0.072 ± 0.045		
3	Море Уэдделла	13	29/69	0.103	0-1.702	0.276 ± 0.487	46/101	0.248	0-1.22	0.339 ± 0.367		
4	Бассейн Пауэлла	48	113/199	0.049	0-1.25	0.178 ± 0.297	4/10	0	0-0.380	0.007 ± 0.055		
5	Оркнейский шельф	8	0/0	0	0	0	2/2	0	0-0.053	0.007 ± 0.019		
6	Оркнейский желоб	15	71/185	0.362	0-2.33	0.482 ± 0.598	5/6	0	0-0.089	0.015 ± 0.028		
7	Море Скотия	13	4/5	0	0-0.036	0.005 ± 0.013	0/0	0	0	0		



Рис. 2. Встречаемость финвалов и горбачей по расчетным участкам в семи районах наблюдений в январе— феврале 2022 г. (порядок участков с юго-запада на северо-восток).



Рис. 3. Встречаемость финвалов (а) и горбачей (b) и станции отбора проб криля разной половозрастной структуры с 18 января по 15 февраля 2022 г. в районе исследований. Цифрами показаны районы: 1 – пролив Брансфилда, 2 – пролив Антарктик, 3 – море Уэдделла, 4 – бассейн Пауэлла, 5 – Оркнейский шельф, 6 – Оркнейский желоб, 7 – Море Скотия.

Так, на самой результативной станции района бассейна Пауэлла концентрация взрослого криля составила 50 г/1000 м³, а неполовозрелого криля — 5 г/1000 м³. Максимальное количество взросло-

го половозрелого антарктического криля было поймано в Оркнейском желобе — 315 г/1000 м³, при этом доля неполовозрелого криля составила 17 г/1000 м³.


Рис. 4. Количество хлорофилла "а", полученное методом прямых измерений, и встречаемость усатых китов по расчетным участкам в районе исследований, 21.01–9.02.22 г.

В северо-западной части моря Уэдделла, где было выявлено большое скопление криля обеих возрастных групп (173 г/1000 м³ половозрелых и 73 г/1000 м³ молоди), наблюдалась высокая встречаемость, как горбачей, так и финвалов (рис. 3).

Встречаемость китов в зависимости от концентрации хлорофилла "а". Статистически значимой корреляции между значениями концентрации хлорофилла, полученного обоими методами измерения, и встречаемостью китов не обнаружено. Так в случае прямых измерений самое низкое (7.0 мг/м²) и самое высокое (1291 мг/м²) количество Chl-a_{int} отмечены в районах с низкой встречаемостью китов (менее 0.15 ос./км). Измерения в участках с высокой встречаемостью китов (более 0.75 ос./км) также показали широкий диапазон значений количества хлорофилла (от 15.7 до 374 мг/м²) (рис. 4). Аналогичная картина наблюдалась при сравнении значений встречаемости китов с данными проточного флюориметра. Значения *Chl-а* колебались от 0.339 до 4.325 мг/м³. при этом минимальное количество животных (менее 0.1 ос./км) отмечено и при 0.339 мг/м³,

и при 3.157 мг/м³ хлорофилла, а максимальное (2.4 ос./км) при 2.084 мг/м³.

Встречаемость финвалов и горбачей в зависимости от глубин. Обнаружено, что горбачи предпочитают более мелководные районы в основном шельфовой зоны, в то время как финвалы тяготеют к более глубоководным пелагическим водам (Mann–Whitney U-test: U = 31756, N1 = 263, N2 = = 506, P = 0.00) (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что среди китообразных в районе наблюдений чаще всего встречались горбачи и финвалы, что было вполне ожидаемо. Действительно, наряду с антарктическими малыми полосатиками (*Balaenoptera bonae-rensis*), эти усатые киты являются самыми многочисленными и широко распространенными в различных антарктических и субантарктических районах [12, 13, 30, 32, 35]. Малые полосатики в этом исследовании практически не наблюдались, что понятно, так как известно, что их распределение тесно связано со льдами [17, 34].

По результатам анализа высокая встречаемость финвалов и горбачей была выявлена в разных районах наблюдений. Финвалы преобладали в водах с резким перепадом глубин в районе желобов и глубоководных бассейнов. Основная часть горбачей, наоборот, отмечена в относительно мелководных проливах и районах с более или менее ровным рельефом. Зависимость распределения от глубины у этих видов китов было описано ранее [4, 14, 16]. Наши исследования являются подтверждением данной закономерности. Предположительно, такое горизонтальное разлеление ниш между финвалами и горбачами может быть связано с различиями в их трофических предпочтениях [32]. Так, Santora J.A. с соавторами [36] обнаружили, что горбатые киты предпочитают более мелкий неполовозрелый криль, обитающий на мелководье. Напротив, финвалы, являясь быстро плавающими хищниками, выбирают для кормления глубоководные районы со сложными батиметрическими и гидрографическими схемами циркуляции воды с преобладанием крупного и взрослого криля [36, 37]. Авторы отмечают, что первоочередную важность для китов при поиске добычи имеет не биомасса криля в воде, а именно его половозрелость [37]. Действительно, репродуктивно зрелый криль богат липидами [26] и, таким образом, может стать источником энергетически богатой пищи для китов [37]. В связи с этим, вполне закономерно, что в нашем исследовании самая высокая встречаемость финвалов была обнаружена в глубоководных районах бассейна Пауэлла и Оркнейского желоба, где было зарегистрировано преобладание половозрелых особей антарктического криля. Самая же высокая встречаемость горбатых китов наблюдалась в достаточно мелководном проливе Брансфилда, где преобладала молодь антарктического криля. Примечательно, что исследования последних двадцати лет показали привязанность финвалов и горбачей к определенным районам кормления, которые остаются примерно постоянными во времени и пространстве [6, 31, 32, 38]. Одним из таких мест для горбатых китов является именно пролив Брансфилда, куда они ежегодно мигрирует для нагула с западного побережья Южной Америки [7, 41]. Для финвалов, очевидно, к постоянным районам нагула можно отнести бассейн Пауэлла, так как здесь их регистрируют в летний период регулярно [16].

В море Уэдделла в большом количестве наблюдались оба вида китов, что вероятно, можно объяснить отсутствием у них межвидовой конкуренции за пищевые ресурсы, так как в этом районе были обнаружены большие уловы разновозрастного криля (рис. 3). Высокая встречаемость горбачей в проливе Антарктик (до 1.125 особей/км)



Рис. 5. Распределение горбачей (HW) и финвалов (FW) в районе исследований в зависимости от глубин.

при наличии там только взрослого криля (20 г/ 1000 м^3), может быть обусловлена тем, что в узком проливе молодой криль мог быть уже съеден или вынесен течением, и киты вовсе не кормились, а мигрировали. Также необходимо учитывать, что на распределение усатых китов влияют не только глубина, обилие и состав пищи, но и другие факторы окружающей среды, которые в данном исследовании не рассматривались.

Особенностью антарктической экосистемы является короткая пищевая цепь от первичных продуцентов (фитопланктона) через зоопланктон к морским млекопитающим. Хлорофилл "а" является существенным активным компонентом биомассы фитопланктона, поэтому он служит как критерием первичной продуктивности, так и удобным для количественной оценки показателем обилия фитопланктона. Не являясь непосредственными потребителями фитопланктона, морские млекопитающие занимают верхний уровень этой трофической цепи. Таким образом, вполне допустимо рассматривать взаимосвязь концентрации хлорофилла "a" (Chl-a) в воде и встречаемости китов в этом районе. Кроме того, в некоторых исследованиях было обнаружено значительное влияние *Chl-а* на распределение китов [7, 18, 21]. В наших исследованиях зависимость встречаемости китов от концентрации хлорофилла "а" не подтвердилась. Вероятно, отсутствие легко идентифицируемой корреляции между концентрацией фитопланктона и присутствием китов в данном конкретном месте в данное время связано с тем, что точная количественная оценка этой взаимосвязи требует динамического подхода. Необходимо принимать во внимание время, за которое биомасса хлорофилла "а" переходит в биомассу планктона, который затем потребляется китами, а также разные масштабы жизненных процессов у этих организмов. При таком подходе тот факт, что при текущей концентрации хлорофилла "а" зафиксированы разные показатели встречаемости китов, не только объясним, но и закономерен. Мы считаем, что требуется больше данных, чтобы лучше понять эти взаимодействия китообразных и океанографических параметров в районе исследования.

Наблюдения, собранные на 26-дневном отрезке 87 рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Антарктике предоставляют вспомогательную информацию о встречаемости финвалов и горбачей в Атлантическом секторе Южного океана и расширяют знания об их текущем состоянии. Вопрос зависимости распределения усатых китов от таких биологических параметров, как концентрация криля различной степени зрелости и содержание хлорофилла в воде требует дальнейших исследований с применением современных методов математического анализа и большего количества станций по их отбору. Эти исследования являются важным вкладом в изучение особенностей современного распределения этих китов в условиях глобального изменения климата.

Благодарности. Авторы благодарят за содействие команду НИС "Академик Мстислав Келдыш" во главе с капитаном Л.В. Сазоновым, а также коллег – участников рейса за помощь и поддержку.

Источники финансирования. Работа выполнена по Государственным заданиям FMWE-2021-0008, FFER-2019-0021 и FWMM-2022-0033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology [Eds.: E.G. Morozov, M.V. Flint, V.A. Spiridonov] // Advances in Polar Ecology (AVPE), V. 6. 2021. Springer, Cham. 455 p.
- Atkinson A., Siegel V., Pakhomov E., Rothery P. Longterm decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean // Nature. 2004. V. 432. P. 100– 103.
- Atkinson A., Hill S.L., Pakhomov E.A. et al. KRILL-BASE: a circumpolar database of Antarctic krill and salp numerical densities, 1926–2016 // Earth Syst. Sci. Data. 2017. V. 9. P. 193–210.

- Bassoi M., Acevedo J., Secchi E.R. et al. Cetacean distribution in relation to environmental parameters between Drake Passage and northern Antarctic Peninsula // Polar Biol. 2020. V. 43. P. 1–15. https://doi.org/10.1007/s00300-019-02607-z
- 5. *Bitiutskii D.G., Samyshev E.Z., Minkina N.I. et al.* Distribution and Demography of Antarctic Krill and Salps in the Atlantic Sector of the Southern Ocean during Austral Summer 2021–2022 // Qatar. 2022, 14, 3812. https://doi.org/10.3390/w14233812
- Dalla Rosa L., Secchi E.R., Kinas P.G. et al. Photoidentification of humpback whales, Megaptera novaeangliae, off the Antarctic Peninsula from 1997/98 to 1999/2000 // Memoirs of the Queensland Museum. 2001. V. 47. P. 555–561.
- 7. *Dalla Rosa L*. Modeling the foraging habitat of Humpback whales // Ph.D. Thesis, The Faculty of Graduate Studies (Zoology) the University of British Columbia (Vancouver), 2010. 170 p.
- Ducklow H., Clarke A., Dickhut R. et al. The marine system of the Western Antarctic Peninsula // In: Rogers A.D. (eds) Antarctic ecosystems: an extreme environment in a changing world, 1st edn. Blackwell, Hoboken. 2012. P. 121–159.
- Friedl P., Seehaus T.C., Wendt A. et al. Recent dynamic changes on Fleming Glacier after the disintegration of Wordie Ice Shelf, Antarctic Peninsula // Cryosphere. 2018. V. 12. P. 1347–1365.
- Friedlaender A.S., Halpin P.N., Qian S.S. et al. Whale distribution in relation to prey abundance and oceanographic processes in shelf waters of the Western Antarctic Peninsula // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2006. V. 317. P. 297–310.
- Gedamke J., Robinson S.M. Acoustic survey of marine mammal occurrence and distribution of East Antarctica (30–80oE) in January-February 2006 // Deep Sea Res. II. 2010. V. 57. P. 968–981.
- Joiris C.R. Spring distribution and ecological role of seabirds and marine mammals in the Weddell Sea, Antarctica // Polar Biol. 1991. V. 11. P. 415–424. https://doi.org/10.1007/BF80233076
- Joiris C.R., Dochy O. A major autumn feeding ground for fin whales, southern fulmars and grey-headed albatrosses around the South Shetland Islands, Antarctica // Polar Biol. 2013. V. 36. P. 1649–1658.
- 14. *Kasamatsu F., Matsuoka K., Hakamada T.* Interspecific relationships in density among the whale community in the Antarctic // Polar Biol. 2000. V. 23. V. 466–473.
- Kawamura A. A review of baleen whale feeding in the Southern Ocean // Rep. Int. Whal. Comm. 1994. V. 44. P. 261–272.
- Kharitonov S.P., Tretyakov A.V., Mischenko A.L. et al. Spatial Distribution, Species Composition, and Number of Marine Mammals in the Argentine Basin, Drake Passage, East of Antarctic Peninsula, and Powell Basin in January–March 2020 // In: Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds) Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Advances in Polar Ecology, vol 6. Springer, Cham. 2021. P. 379–398.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

- 17. Kock K-H., Scheidat M., Boebel O. et al. The Occurrence of Cetaceans along two Transects from 57° S to Atka Bay (70°29.6' S/07°57.6' W). SC/61/IA11 // International Whaling Commission, Cambridge, UK. 2009
- 18. Laran S., Gannier A. Spatial and temporal prediction of fin whale distribution in the northwestern Mediterranean Sea // ICES J Mar Sci. 2008. V. 65. V. 1260-1269.
- 19. Leaper R., Miller C. Management of Antarctic baleen whales amid past exploitation, current threats and complex marine ecosystems // Antarct Sci. 2011. V. 23. P. 503-529.
- 20. Lerczak J.A., Hobbs R.C. Calculation Sighting distances from angular readings during shipboard, aerial, and shore based marine mammal surveys // Mar. Mamm. Sci. 1998. V. 14, 3. P. 590-599.
- 21. Loeb V.J., Hofmann E.E., Klinck J.M. et al. ENSO and variability of the Antarctic Peninsula pelagic marine ecosystem // Antarct Sci. 2009. V. 21. P. 135-148.
- 22. Mackintosh N.A. The stocks of whales // Fishing News (Books), London. 1965. 232 p.
- 23. Mackintosh N.A., Brown S.G. Preliminary estimates of the southern populations of the larger baleen whale // Norsk Hvalfangstmus. 1953. V. 45. P. 469-480.
- 24. Meredith M.P., King J.C. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century // Geophys. Res. Lett. 2005. 32:L19604.

https://doi.org/10.1029/2005gl024042

- 25. Murphy E.J., Watkins J.L., Trathan P.N. et al. Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 2007. V. 362. P. 113-148.
- 26. Nicol S., De la Mare W.K., Stolp M. The energetic cost of egg production in antarctic krill (Euphausia superba Dana) // Antarct. Sci. 1995. V. 7. P. 25-30.
- 27. Nicol S., Worby A., Leaper R. Changes in the Antarctic sea ice ecosystem: potential effects on krill and baleen whales // Mar. Freshw. Res. 2008. V. 59. P. 361-382.
- 28. Nicol S., Foster J., Kawaguchi S. The fishery for Antarctic krill - recent developments // Fish and Fisheries. 2012. V. 13. P. 30-40.
- 29. Nøttestad L., Krafft B.A., Søiland H., Skaret G. Observations of cetaceans in the south-east Atlantic sector of the Southern Ocean, during summer 2008 // Polar. Biol. 2014. V. 37. P. 891-895. https://doi.org/10.1007/s00300-014-1477-y
- 30. Nowacek D.P., Friedlaender A.S., Halpin P.N. et al. Super-aggregations of krill and humpback whales in Wilhelmina Bay, Antarctic Peninsula // PLoS ONE. 2011. 6(4):e19173.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019173

31. Orgeira J.L., Alderete M.C., Jiménez Y.G., González J.C. Long-term study of the at-sea distribution of seabirds and marine mammals in the Scotia Sea, Antarctica // Advances in Polar Science. 2015. V. 26. P. 158-167. ISSN 1674-9928.

https://doi.org/10.13679/j.advps.2015.2.00158

ОКЕАНОЛОГИЯ Nº 4 2023 том 63

- 32. Orgeira J.L., González J.C., Jiménez Y.G., Benítez L.M. Occurrence of fin and humpback whales in the Scotia Sea and the Protected Marine Area of the South Orkney islands, Antarctica // Mastozool. Neotrop. 2017. V. 24. P. 135-143.
- 33. Reid K., Brierley A.S., Nevitt G.A. An initial examination of relationships between the distribution of whales and Antarctic krill Euphausia superba at South Georgia // J. Cetacean Res. Manag. 2000. V. 2. P. 143-149.
- 34. Reid K., Croxall J.P., Briggs D.R., Murphy E.J. Antarctic ecosystem monitoring: quantifying the response of ecosystem indicators to variability in Antarctic krill // ICES J. Mar. Sci. 2005. V. 62. P. 366-373. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004. 11.003
- 35. Rossi-Santos M.R., Baracho C., Cipolotti S., Marcovaldi E. Cetacean sightings near South Georgia islands, South Atlantic Ocean // Polar Biol. 2007. V. 31. P. 63-68. https://doi.org/10.1007/s00300-007-0333-8
- 36. Santora J.A., Reiss C.S., Loeb V.J., Veit R.R. Spatial association between hotspots of baleen whales and demographic patterns of Antarctic krill Euphausia superba suggests size-dependent predation // Mar Ecol Prog Ser. 2010. V. 405. P. 255-269. https://doi.org/10.3354/ meps08513
- 37. Santora J.A., Schroeder I.D., Loeb V.J. Spatial assessment of fin whale hotspots and their association with krill within an important Antarctic feeding and fishing ground // Mar. Biol. 2014. V. 161. P. 2293-2305. https://doi.org/10.1007/s00227-014-2506-7
- 38. Secchi E.R., Dalla Rosa L., Kinas P.G. Encounter rates of whales around the Antarctic Peninsula with special reference to humpback whales, Megaptera novaeangliae, in the Gerlache Strait: 1997/98 to 1999/2000 // Mem. Queensl. Mus. 2001. V. 47(2). P. 571-578.
- 39. Siegel V., Kawaguchi S., Ward P. et al. Krill demography and large-scale distribution in the southwest Atlantic during January/February 2000 // Deep Sea Research II. 2004. V. 51. P. 1253-1273. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.06.013
- 40. Sirovic A., Hildebrand J., Thiele D. Baleen whales in the Scotia Sea during January and February 2003 // J. Cetacean Res. Man. 2006. V. 8. P. 161-171.
- 41. Stevick P.T., Aguayo A., Allen J. et al. Migrations of individually identified humpback whales between the Antarctic Peninsula and South America // The Journal of Cetacean Research and Management. 2004. V. 6. P. 109-113.
- 42. Thiele D., Chester E.T., Gill P.C. Cetacean distribution off Eastern Antarctica (80°-150° E) during the austral summer of 1995/96 // Deep Sea Res. II. 2000. V. 47. P. 2543-2572.
- 43. Tin T., Fleming Z.l., Hughes K.A. et al. Impacts of local human activities on the Antarctic environment // Antarct. Sci. 2008. V. 21. P. 3-33.
- 44. Tynan C.T. Ecological importance of the Southern Boundary of the Antarctic circumpolar current // Nature. 1998. V. 392. P. 708-710.

Occurrence and Distribution of Fin Whales (*Balaenoptera physalus*) and Humpback Whales (*Megaptera novaeangliae*) in the Antarctic Atlantic Sector

A. D. Chernetsky^{*a*, #}, P. V. Chukmasov^{*b*}, V. V. Krasnova^{*a*}, A. V. Tretiakov^{*b*}, L. G. Tretiakova^{*b*}, D. G. Bitiutskiy^{*c*}, S. A. Mosharov^{*a*}, P. A. Salyuk^{*d*}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bSevertsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^cSector of the World Ocean, Azov-Black Sea Branch of the Russian Federal Research Institute

of Fisheries and Oceanography ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don, Russia

^dV.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia [#]e-mail: adcher@ocean.ru</sup>

The occurrence and distribution of fin whales and humpback whales along the route of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh* in the Antarctic Atlantic sector in January and February 2022 were studied. The features of the whales' distribution were considered depending on the depth of the water area, the abundance and age of krill, and the *Chl-a* concentration in the water. The highest occurrence of fin whales was found in the deep waters of the Powell Basin and the Orkney Trench, where the highest concentrations of adult krill have been recorded. The highest occurrence of humpback whales was observed in the shallow Bransfield Sound, where small and young krill predominated. The dependence of the occurrence of whales on the concentration of chlorophyll was not confirmed.

Keywords: Antarctic Atlantic sector, cetaceans, fin whales, humpback whales, occurrence, spatial distribution

———— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 599.51/.53/.745

ЧИСЛЕННОСТЬ МАССОВЫХ ВИДОВ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ОКРЕСТНОСТЯХ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА, МОРЯ СКОША И БАССЕЙНА ПАУЭЛЛА

© 2023 г. С. П. Харитонов^{1,} *, А. В. Третьяков¹, П. В. Чукмасов¹, А. Д. Чернецкий², А. Л. Мищенко¹, Н. Б. Конюхов¹, А. Е. Дмитриев¹, С. М. Артемьева³, Г. Ю. Пилипенко⁴, М. С. Мамаев¹, Л. Г. Третьякова¹, В. В. Рожнов¹

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ³Научно-исследовательский зоологический музей Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия ⁴Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

> *e-mail: serpkh@gmail.com Поступила в редакцию 24.10.2022 г. После доработки 02.03.2023 г. Принята к публикации 27.03.2023 г.

Проведена оценка численности массовых видов морских млекопитающих в районе Южных Шетландских островов, в море Скоша и в бассейне Пауэлла в ходе двух рейсов НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Антарктику (рейс 79 – два этапа в январе—начале марта 2020 г., рейс 87 – один этап в январе—феврале 2022 г.). В 2022 г. район работ располагался в 150 км восточнее района работ в 2020 г. В 2020 г. в акваториях у Антарктического полуострова площадью немногим более 343000 км² находилось около 1200 горбатых китов *Megaptera novaeangliae* и 2800 финвалов *Balaenoptera physalus*, а в 2022 г. – не менее 1200 горбатых китов и около 2500 финвалов. Характер распределения встреч этих китов вдоль маршрута судна указывает на отсутствие как внутри-, так и межвидовой пищевой конкуренции. Антарктических морских котиков *Arctocephalus gazella* в оба сезона здесь было примерно 2–3 тыс. особей, однако оценка их численности менее точна, чем для горбатых китов и финвалов.

Ключевые слова: Антарктика, горбатый кит, *Megaptera novaeangliae*, финвал, *Balaenoptera physalus*, антарктический морской котик, *Arctocephalus gazella*, численность **DOI:** 10.31857/S0030157423040068. **EDN:** YLLEAU

введение

Экспедиционные исследования советских ученых в Антарктике начались в 1957 г. Российские ученые продолжили исследования в этом районе мирового океана. Основная задача проводившихся работ была ресурсоведческая: выяснение биологической продуктивности этой части Мирового океана [2]. К концу XX в. интенсивность работ значительно снизилась, а после 2004 г. они и вовсе прекратились. Лишь в декабре 2019 г. экспедиционные исследования были возобновлены: начала выполняться Программа комплексных экспелиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана. В программе участвует более 10 академических институтов, головным из которых является Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН [2, 3]. В рамках этой программы Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН выполняет проект "Ресурсные исследования экосистемы Южного океана (Атлантический сектор Антарктики)", который включает, в том числе, выяснение современного состояния биологических ресурсов особо продуктивных районов Антарктики. К ним относятся окрестности Антарктического полуострова, пролив Брансфильд, северная часть моря Уэдделла и бассейн Пауэлла.

Научно-исследовательское судно "Академик Мстислав Келдыш", которое провело два рейса в Антарктику (79 и 87), в ходе экспедиций выполняло множество задач: гидрофизические, метеорологические, гидробиологические, в том числе наблюдения за морскими птицами и морскими млекопитающими. Целью наблюдений было выяснить характер влияния различных факторов среды (в частности, погоды и глубин моря) на присутствие птиц и млекопитающих. Результаты наблюдений морских птиц и млекопитающих в

значительной степени обработаны и представлены в ряде публикаций, в которых рассмотрено влияние морских глубин на распределение исследуемых видов, а также приведены результаты факторного анализа, показывающие связь нахождения животных в том или ином районе моря в зависимости от параметров погоды. Кроме того, проведен математический анализ пространственного распределения разных видов и групп морских позвоночных [8, 18-20]. Видовой состав орнитофауны и морских млекопитающих описан также в статье, посвященной рейсу судна Атлантического филиала ФГБНУ "ВНИРО" ("Атлант-НИРО") CTM K-1704 "Атлантида", которое работало примерно в том же районе Антарктики и примерно в те же сроки [4, 11].

После проведенных анализов мы попытались решить задачу, которая не была изначально запланирована, но имеет большое ресурсное значение — оценить численность основных встреченных видов морских млекопитающих: горбатого кита (*Megaptera novaeangliae*), финвала (*Balaenoptera physalus*) и антарктического морского котика (*Arctocephalus gazella*). В настоящей статье приведены результаты этой оценки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа НИС "Академик Мстислав Келдыш" (рейс 79) в проливе Дрейка, окрестностях Антарктического полуострова, море Скоша и северной части моря Уэдделла проходила в два этапа: с 16 января по 6 февраля и с 8 февраля по 3 марта 2020 г. С 6 по 8 февраля был осуществлен промежуточный заход в порт Ушуайя, Аргентина. Общая длина маршрута от широты пролива Бигль и обратно составила около 6000 км на каждом этапе, всего в водах пролива Дрейка, моря Скоша и окрестностей Антарктического полуострова судно прошло около 12000 км. В феврале 2020 г. судно не заходило в окрестности Южных Оркнейских островов, и район обследования простирался на восток в долготном направлении немного меньше, чем в январе. Однако поскольку в феврале оно заходило более чем на 100 км западнее, чем в январе, широтное покрытие для обоих месяцев было практически одинаковым (рис. 1). В ходе 87 рейса в 2022 г работа в Антарктике проходила в период 17.01–16.02, а район работ располагался на 150 км восточнее района работ 79 рейса; тем не менее, районы работ обоих рейсов перекрывались более чем на две трети.

Наблюдения проводили в течение всего светлого времени суток, в основном, с пеленгаторной палубы корабля. В них участвовали два наблюдателя, которые стояли по правому и левому борту судна. Продолжительность каждой смены наблюдений согласовывалась со сменой вахт на корабле и для каждой пары наблюдателей составляла 4 часа, однако утром и вечером, в зависимости от времени восхода и захода солнца, периоды наблюдений могли быть короче. Наблюдатели, кроме биноклей, были экипированы фотоаппаратами с длиннофокусными объективами. Практически все встреченные морские млекопитающие были сфотографированы. Во время наблюдений регистрировали вид, число особей в группе (если были встречены группы), поведение животных, наличие льда (айсбергов) и общие показатели погоды. В течение всего маршрута судна три полевых GPS-навигатора постоянно фиксировали координаты хода судна, поэтому для каждой встречи с биологическими объектами в океане были известны ее координаты.

Всего по атлантическому сектору Южного океана в 2020 г. собраны данные по 1142 встречам с представителями 20 видов морских млекопитающих (общее количество встреченных животных – 2140), в 2022 г. – по 614 встречам с представителями 17 видов (общее количество животных – 1198). Видовой состав морских млекопитающих, встреченных в 79-м рейсе, рассмотрен нами ранее [18], в 87-м рейсе – в статье, публикуемой в этом же выпуске журнала "Океанология" [10].

Оценка численности морских млекопитающих. Оценка численности морских млекопитающих проведена только для тех видов, для которых собрано наибольшее количество данных: *горбатый кит* – январь 2020 г. – 127 встреч (201 особь), февраль 2020 г. – 64 встречи (124 особи), январь-февраль 2022 г. – 142 встречи (263 особей); *финвал* – январь 2020 г. – 148 встреч (234 особи), февраль 2020 г. – 165 встреч (385 особей), январь-февраль 2022 г. – 244 встречи (506 особей); *антарктический морской котик* – январь 2020 г. – 315 встреч (396 особей); февраль 2020 г. – 109 встреч (169 особей), январь-февраль 2022 г. – 123 встречи (198 особей).

В идеале для оценки численности и плотности морских млекопитающих судно должно идти по заранее запланированным и равномерно расположенным трансектам [23]. Однако в ходе 79 и 87 рейсов НИС "Академик Мстислав Келдыш" возможность такого планирования маршрута отсутствовала. Тем не менее, имея данные по встреченным животным, мы применили два метода расчета абсолютной численности морских млекопитающих для пройденного участка акватории.

Опираясь на траекторию хода НИС "Академик Мстислав Келдыш", нами был оконтурен полигон, для которого производили расчет численности морских млекопитающих (рис. 1). Это основной район работ по морским млекопитающим и птицам, он располагается к востоку от Антарктического полуострова южнее 59°30' ю.ш. и включает ряд архипелагов, площадь его около 350600 км². Из площади этого полигона была вычтена площадь



Рис. 1. Распределение встреч горбатых китов (белые кружки) и финвалов (белые крестики) в январе 2020 г. (а), феврале 2020 г. (б) и январе—феврале 2022 г. (в). Сплошная черная линия — маршрут судна на каждом рассматриваемом промежутке времени, штриховая линия — граница полигона, для которого рассчитывали численность китов.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

всех расположенных здесь островов (7191.1 км²), в результате чего площадь акватории, на которую экстраполировали последующие расчеты общей численности морских млекопитающих, составила 343408.9 км². Полигон 87 рейса был такого же размера, как и полигон 79 рейса, но, в соответствии с траекторией хода судна, располагался на 150 км восточнее. В январе 2020 г. в районе исследований отработано в 269 ч 15 мин, в феврале — 233 часа 55 мин, в январе-феврале 2022 г. – 427 ч 5 мин.

Площади акваторий учета, на которых были встречены морские млекопитающие, мы вычисляли двумя способами: один основан на области видимости, второй – на ближайших (средних минимальных) расстояниях между точками встреч млекопитающих.

Первый способ вычисления площади акватории учета носит название distance sampling method [15, 16, 22] и широко используется при учетах китообразных. Он основан на широком применении экстраполяции, что в условиях моря представляется приемлемым, так как морская среда более однородна, чем наземная. При этом способе ежедневно строились области учета на основе трека движения судна и областей видимости по обоим бортам судна. Видимость акватории по ходу судна все время менялась, моменты ее изменения фиксировались. Для каждого дня нахождения судна в Антарктике вычисляли общую плошаль акватории вилимости. на которой могли быть встречены морские млекопитающие, суммируя площади полей видимости, определенные по датам как площади последовательно расположенных прямоугольников или трапеций. Например, если судно прошло 1 км при видимости 500 м, получалось два прямоугольника (по обе стороны от судна) со сторонами 1 км и 500 м и таким образом для этого отрезка пути площадь акватории учета составила $0.5 \times 1 \times 2 = 1$ км²; если затем видимость изменилась и стала 1 км, а судно прошло при такой видимости 2 км, акватория учета составила 4 км², и т.д. Последующее суммирование ежедневных акваторий учета отдельно за январь и за февраль давало обшую плошаль акватории учета на каждом из двух этапов экспедиции. Общее число встреч морских млекопитающих каждого вида делили на значение суммарной площади учета (отдельно для января и февраля) и получали плотность каждого вида в пересчете на 100 км². Затем проводили стандартную процедуру экстраполяции: умножая плотность на общую площадь акватории полигона (343408.9 км²), получали общую оценочную численность каждого вида в данном районе Антарктики.

Второй способ вычисления площади акватории основан на ближайших расстояниях между точками встреч млекопитающих — так называе-

мый метод "ближайшего соседа", использующий коэффициент Кларка-Эванса [13] и подробно описанный ранее [6, 7, 17]. Обычно этот метод широко используется для неподвижных объектов, но поскольку морские млекопитающие перемещались медленно, мы посчитали возможным пренебречь их движением и применить этот метод. При таком способе для каждого вида у нас был общий полигон встреч в пределах исследуемого полигона, без разделения на дни. Затем описанным выше способом для каждого вида вычисляли плотность популяции, а на ее основе – общую численность. В описанной модификации этот способ применен нами для учета морских млекопитающих впервые. Его использование представляется логичным, так как он применяется при изучении особенностей пространственного распределения биологических объектов. Он оказался сходен с другим методом, также широко применяемым для учета китов – т.н. density surface hurdle model, при котором их численность оценивается исходя из вероятности присутствия животных на разных участках пути судна. Применение вероятностного подхода более адекватно для тех случаев, когда судно движется по трансектам. В обеих модификациях - и в методе "ближайшего соседа", и в density surface hurdle model [16], используется один и тот же подход, основанный на сравнении распределения встреч китов с распределением Пуассона. Причина выбора нами метода "ближайшего соседа" – его бо́льшая простота по сравнению с вычислением вероятностей встреч. Кроме того, при использовании распределения Пуассона для оценки распределения объектов требуется введение ряда логических ограничений, которые ранее выполнены для метода "ближайшего соседа" [7] и далеко не всегда выполняются при других способах расчета. Получаемые при обоих способах результаты вполне сопоставимы друг с другом, особенно с учетом неизбежной ошибки оценки численности китов.

Характер распределения объектов (особей) в пространстве принято подразделять на три т.н. типа распределения: 1) случайное – когда особи располагаются в пространстве (плоскости, линии) независимо друг от друга, математически их распределение описывается при помощи распределения Пуассона; 2) групповое, точнее – отклонение от случайного распределения в сторону группового, когда в пространстве (плоскости, линии) можно выделить группы объектов, при этом расстояние между объектами внутри групп меньше расстояния между группами; 3) равномерное, точнее - отклонение от случайного распределения в сторону равномерного, когда среднее расстояние между объектами больше, чем при случайном распределении [21]. Тип распределения (математический) — очень важная характеристика биологических объектов, поскольку является

Покозототи	Виды	Рейс 79		Рейс 87	
Показатель		январь 2020 г.	февраль 2020 г.	январь-февраль 2022 г.	
Длина пути судна внутри полигона (км)		3714	3477	6000	
Число особей в пересчете	Горбатый кит	1.02		0.62	
на час наблюдений	Финвал	1.82		1.18	
	Финвал + "усатый кит"	2.12		1.41	
Число особей на основе полей видимости	Горбатый кит	1569	823	1248	
	Финвал	2381	2554	2374	
	Финвал + "усатый кит"	2427	3377	2534	
	Антарктический морской котик	2996	1114	809	
Число особей	Горбатый кит	708	814	520	
на основе метода ближайшего соседа	Финвал	2814	2149	1507	
	Финвал + "усатый кит"	2868	3069	1072	
	Антарктический морской котик	890	798	485	

Таблица 1. Экстраполированная численность морских млекопитающий в Антарктике по результатам рейсов 79 и 87 НИС "Академик Мстислав Келдыш"

индикатором поведенческих отношений между особями. Групповое распределение сигнализирует либо о стремлении особей "собраться" в районе действия какого-либо фактора среды или о социальном притяжении между особями. Равномерное распределение говорит об антагонизме между особями, причиной такого антагонизма в норме является либо пищевая конкуренция, либо конкуренция за территорию [21].

Удобным способом математической оценки типа распределения является метод Кларка-Эванса [13] через среднее расстояние до ближайшего соседа в совокупности объектов. Коэффициент Кларка-Эванса – R – дает представление о типе распределения: для случайного распределения R = 1, или, точнее, недостоверно отличается от единицы; для групповых распределений R достоверно меньше единицы, для равномерного – больше единицы. Этот метод выработан для распределения на плоскости, но его удалось модифицировать, чтобы он работал и на линии [6, 17].

Для выяснения типа распределения видов морских млекопитающих можно было использовать только метод оценки этого распределения на линии [6], которой в нашем случае служил трек судна. Поскольку наблюдения по ночам не вели, для оценки распределения ночные отрезки маршрута были вычтены из общего трека судна, т.е. эта оценка проводилась на прерывистых линиях [6, 17].

Статистическая обработка проведена с помощью программного пакета Statistica-12, StatSoft Inc. Для картографических работ использована программа MapInfo-12.5. Математические характеристики типа распределения встреч морских млекопитающих получены при помощи компьютерной программы "Карта колонии" ("Colonmap") [5], методика подробно описана нами ранее [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Число горбатых китов и финвалов, встреченных в единицу времени. Данные по количеству отработанных часов и числу встреченных за это время китов позволили посчитать среднее число китов каждого вида за час наблюдений (табл. 1). Эти величины, хотя и не используется для дальнейших расчетов, являются одним из показателей численности китов в данном районе Антарктики. В отдельную строку вынесено суммарное число финвалов и неопределенных усатых китов, поскольку последние с большой вероятностью тоже были финвалами [18]. Можно видеть, что в пересчете на час наблюдений число горбатых китов в январе-феврале 2020 г., а также в январе-феврале 2022 г. сходно, что с большой вероятностью свидетельствует, что в эти периоды в исследуемом районе держалось примерно одинаковое количество этих китов. В этот же временной промежуток наблюдалось сходное между собой число финвалов за час. При этом, если неопределенных усатых китов тоже считать финвалами, то приросты их числа в час в сезоны 2020 и 2022 гг. близки друг к другу (увеличение числа особей в час в случае суммирования финвалов с неопределенными усатыми китами составило всего около 1.2 раза, табл. 1). Эти близкие друг к другу в разные перио-

Период работы	Вид	Кол-во встреч	Коэффициент Кларка-Эванса (<i>R</i>)	Достоверность <i>R</i>	Тип распределения
Январь 2020	Горбатый кит	132	0.66	<i>P</i> < 0.001	Групповое
	Финвал	203	0.95	P = 0.46	Случайное
	Антарктический	314	0.95	P = 0.012	Групповое
	морской котик				
Февраль 2020	Горбатый кит	66	0.71	<i>P</i> < 0.001	Групповое
	Финвал	165	0.91	P = 0.23	Случайное
	Антарктический	108	1.09	P = 0.36	Случайное
	морской котик				
Январь— февраль 2022	Горбатый кит	141	1.07	P = 0.40	Случайное
	Финвал	243	1.01	P = 0.88	Случайное
	Антарктический	123	0.95	P = 0.57	Случайное
	морской котик				

Таблица 2. Тип распределения морских млекопитающих вдоль траектории хода судна

ды значения свидетельствуют о том, что имеет смысл оценить общую численность двух наиболее массовых видов китов в районе работ.

В течение 87 рейса число китов в час было несколько меньше, чем во время 79 рейса (табл. 1).

Численность морских млекопитающих, определенная на основе полей вилимости. Приведем способ подсчета значений численности, которые приводятся в табл. 1. Общая площадь полей видимости во время 79 рейса внутри полигона обследования в январе 2020 г. составила 45278.97 км². За это время было встречено 207 горбатых китов, соответственно плотность составила 0.457 особи/ 100 км²; финвалов было встречено 314, их плотность составила 0.693 особи/100 км². Если считать финвалами и неопределенных до вида усатых китов [18], их общая плотность составляет 0.707 особи/100 км². Исходя из этих рассчитанных плотностей китов и общей площади акватории полигона (343408.9 км²) в январе 2020 г. численность их составила: 1569 горбатых китов, 2380 финвалов, 2428 финвалов с учетом неопределенных до вида усатых китов (табл. 1). Подобным образом получены результаты по остальным рассматриваемым группам морских млекопитающих (табл. 1).

Выполняя такие подсчеты, следует иметь в виду, что полученные для китов значения несколько занижены, так как их фонтаны на дальних границах полей видимости видны хуже, чем на относительно небольших расстояниях от судна. Для антарктических морских котиков, не имеющих фонтанов, этот метод является значительно менее точным, чем для китов, поскольку заметить их, особенно на дальних расстояниях значительно труднее. Численность морских млекопитающих, определенная методом "ближайшего соседа", дала несколько иные значения, чем на основании полей видимости (табл. 1).

Распределение встреч китообразных вдоль траектории хода судна. В ходе 79 рейса тип распределения горбатых китов вдоль траектории хода судна (на основе коэффициента Кларка-Эванса, *R*) и в январе, и в феврале 2020 г. был достоверно групповым (табл. 2). Средние линейные плотности встреч горбатых китов составили: 5 встреч/100 км маршрута в январе и 2 встречи/100 км — в феврале. Распределение финвалов вдоль хода судна и в январе, и в феврале 2020 г. было случайным (табл. 2). Средняя линейная плотность встреч финвалов была 17.2 встреч/100 км в январе и 6.5 встреч/ 100 км в феврале. У антарктических морских котиков в январе 2020 г. распределение числа встреч было групповым, а в феврале стало случайным (табл. 2). Линейная плотность встреч котиков составила 15.2 встреч/100 км в январе и 4 встречи/100 км в феврале. В ходе рейса 87 распределение и горбатых китов, и финвалов было случайным (табл. 2). Средняя линейная плотность встреч горбатых китов была 14.6 встречи/100 км, финвалов – 14 встреч/100 км. Суммарное за январьфевраль 2022 г. распределение котиков указывает на их случайный характер их встреч, хотя величина коэффициента *R* здесь все же меньше единицы (0.95), что может говорить о некоторой тенденции распределения встреч котиков к групповому, поскольку значения R < 1 соответствует групповому распределению ([13]).

ОБСУЖДЕНИЕ

Численность морских млекопитающих в обследованном районе Антарктики. Полученные нами значения плотности и численности морских млекопитающих являются оценочными. Каждый из способов подсчета численности имеет свои преимущества и недостатки. Так, первый метод расчета численности горбатых китов в январе 2020 г. дал 1570 особей и вдвое меньше в феврале -823 кита, а второй — 708 в январе и 814 — в феврале. Последние три значения довольно близки друг к другу, что позволяет предполагать, что в оба месяца в районе исследований находилось примерно одно и то же количество горбатых китов. К такому же заключению можно прийти, исходя из среднего числа встреч китов в час: 0.93 и 1.04. Однако кажущееся сильное преобладание числа горбатых китов, вычисленное нами первым методом, не столь велико: в других исследованиях оценки численности китов в одном и том же районе разными методами имели гораздо большее расхождение [16, 22]. Учитывая выявленные нами изменения распределения горбатых китов от января к февралю [9, 18], оценка численности китов первым методом может быть реальной, однако поскольку поведенчески это явление не прослежено, при выведении значения общей численности мы вынуждены опираться на все полученные нами значения экстраполяций.

В 2022 г. число встреч с горбатыми китами было меньше, чем в 2020 г., хотя цифры вполне сопоставимы друг с другом (табл. 1). Возможно, что это связано с более восточным положением района исследований в 2022 г., поскольку число горбатых китов во все периоды исследований к востоку уменьшалось.

В других исследованиях численность горбатых китов в данном районе антарктическим летом варьировала значительно. Известно, что численность горбатых китов в Антарктике увеличивается [12, 14]. В 2006 г. в проливе Брансфилд и немного к западу, в акватории, очень похожей на ту, что была в наших исследованиях, учтено 865 горбатых китов (возможный разброс величин – 656– 1141), тогда как в проливе Дрейка их было около 5000 [22]. По учетам января-марта 2013 г. в проливе Брансфилд было более 3000 горбатых китов [15]. В ноябре-декабре 2019 г. были большие кормовые скопления горбатых китов в проливе Брансфилд и окрестностях Антарктического полуострова, в январе 2020 г. эти киты стали более равномерно распределяться по акватории [16]. По данным учетов 2000-2001 гг. и 2001-2002 гг. в окрестностях Антарктического полуострова вместе с проливом Дрейка учтено 1829 (978-3422) горбатых китов [23].

Что касается финвалов, в январе и феврале 2020 г. их численность, оцененная нами обоими методами, варьировала незначительно, в пределах 2149—3377 особей. Литературные данные, так же, как и для горбатых китов, показывают большую вариацию численности этих китов примерно в том же районе в разные годы. В 2006 г. в проливе Брансфилд учтено всего 94 финвала [22]. По учетам 2000–2001 гг. и 2001–2002 гг. в окрестностях Антарктического полуострова вместе с проливом Дрейка учтено 4487 (1326–15179) финвалов [23]. Данные по финвалам для 2020 и 2022 гг. более "ровные", чем по горбатым китам, что также позволяет считать численность и этих китов в данном районе Антарктики примерно одинаковой летом 2020 и 2022 гг.

Полученные нами учетные данные вполне сопоставимы с предыдущими данными, известными из литературы: по предыдущим исследованиям численность горбатых китов в районе Антарктики, более обширном, чем очерчено в данном сообщении (то есть, включая еще и пролив Дрейка), варьирует в пределах 600–2000 особей, финвалов – примерно 3000–5000. Поэтому в качестве финальной оценки можно принять, что в исследуемом районе в январе—феврале 2020 г. находилось примерно 1200 горбатых китов и 2800 финвалов. В 2022 г. здесь тоже отмечено 1200 или больше горбатых китов и примерно 2500 финвалов.

Располагая данными по антарктическим морским котикам. мы попытались теми же двумя методами оценить их численность. Результаты вычислений по своей структуре оказались похожи на результаты учетов горбатых китов: довольно "ровные" данные для первого метода в феврале и второго метода в январе и феврале 2020 г. – значения варьируют в пределах 798-1114 животных. В то же время по январским расчетам первым методом котиков было значительно больше -2996 особей. Это объяснимо, если котики создают повышенную концентрацию у судна, то есть стремятся к нему, как, например, многие морские птицы [9]. Как и в случае с горбатыми китами, поведенческие наблюдения это не подтверждают, поскольку некоторых котиков заставали спящими на воде, однако, исключать такую возможность, на наш взгляд, не следует. Здесь, как и в случае с горбатыми китами, имеется резкое падение оценок первым методом от января к февралю 2020 г. В случае с антарктическими морскими котиками это может быть объяснено и тем, что в феврале они начинают миграцию на север [1], при этом часто используют льды в качестве площадок для отдыха. Однако в 2022 г. количество учтенных котиков было значительно меньшим, чем в 2020 г. Это может быть объяснимо различиями ледовой обстановки во время 79 и 87 рейсов: хотя плотность ледяных полей в наших исследованиях специально не измерялась, плавучих льдов в 2020 г. было по крайней мере более чем вдвое больше, чем в 2022 г. Возможно также, что меньшее число котиков в 2022 г. связано с более восточным положением курса судна в январе, в результате чего была охвачена акватория, более удаленная от архипелагов, на которых антарктические морские котики размножаются, а миграцию этих животных не удалось проследить в достаточной мере. Предварительно можно считать, что в пределах рассматриваемого полигона находилось 2000—3000 антарктических морских котиков. В настоящее время восстанавливаются многие прежде использовавшиеся лежбища антарктических морских котиков, и численность этих млекопитающих растет [1].

Возможные факторы, влияющие на характер распределения морских млекопитающих в исследуемом районе. Известно, что горбатые киты придерживаются прибрежных вод континентального шельфа и в открытом океане встречаются довольно редко. Финвалы ведут более пелагический образ жизни, чем горбатые киты, чаще встречаются в обширных открытых морских акваториях. В 2020 г. в январе средняя глубина в пределах изученного полигона в Антарктике, где встречались горбатые киты, составляла $M = 1217 \pm 108$ м, N = 132, в феврале она была примерно такой же $-M = 1270 \pm 114$ м, N = 66. Для финвалов в 2020 г. в январе средняя глубина составляла $M = 2120 \pm 86$ м, N = 203, в феврале достоверно меньше $-M = 1503 \pm 78$ м, N = 166. В январе-феврале 2022 г. в рабочем полигоне (рис. 1, в) средняя глубина встреч горбатых китов составляла $M = 977 \pm 82$ м N = 143, финвалов $M = 2169 \pm 103$ м N = 241.

Определение типа пространственного или линейного распределения биологических объектов является хорошим способом понять некоторые дополнительные особенности популяционной структуры и "степень благополучия" вида в конкретных условиях. Тип пространственного распределения (математический) является индикатором характера взаимодействий (биологических) между объектами.

Групповое распределение горбатых китов в январе и феврале 2020 г. может указывать на следование этими китами определенным условиям внешней среды или на взаимное социальное притяжение к особям своего вида [21]. Возможно, что именно концентрации криля в том или ином виде могла послужить причиной концентрации этих китов. Случайное распределение встреч финвалов в 2020 и 2022 гг. указывает на нейтральное отношение особей этого вида друг к другу. В 2022 г. распределение встреч горбатых китов также становится случайным, что возможно свидетельствует о также случайном в этом сезоне распределении мезозоопланктона, которым преимущественно питаются финвалы.

Антарктические морские котики в январе имели ярко выраженное групповое распределение, причем основные группировки котиков отмечены у вершины Антарктического полуострова и соседних островов, возле Южных Шетландских и Южных Оркнейских островов, то есть недалеко от берега. К февралю распределение котиков стало случайным. Такое изменение распределения может быть связано с особенностями их цикла размножения: в январе котики все еще находятся близко от лежбищ, в феврале они начинают мигрировать на север [1]. В 2022 г., поскольку характер сбора данных за эти два месяца носит смешанный характер, коэффициент Кларка-Эванса указывает на групповое распределение котиков, однако из-за превращения распределения в случайное в феврале этот коэффициент стал недостоверен, и распределение за весь период характеризуется как случайное.

Подчеркнем, что равномерное распределение биологических объектов обычно является следствием насыщения данной области представителями какого-либо вида и даже отражает наличие антагонизма и конкуренции между особями [21]. Нами нигде не было обнаружено равномерного распределения среди морских млекопитающих, а соответственно и конкуренции ни внутри, ни между видами. Это свидетельствует, что имеющееся количество пищи для китов в данное время представляется достаточным. Здесь хотелось бы обратить внимание еще на один факт: в восточной части исследуемого района Антарктики, где горбатые киты встречаются единично, эти встречи расположены не в любых местах, а там, где есть скопления финвалов. Это относится не к каждому скоплению, но такая тенденция отмечалась достаточно часто (рис. 1а, 1в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши учетные данные по китообразным вполне сопоставимы с литературными сведениями, где приводятся более ранние исследования указанного в данной статье района Антарктики. В качестве финальной оценки вполне можно принять, что в исследуемом районе в окрестностях Антарктического полуострова площадью немногим более 343 тысячи км² в январе-феврале 2020 г. находилось примерно 1200 горбатых китов и 2800 финвалов, в январе-феврале 2022 г. здесь отмечено также 1200 или больше горбатых китов и примерно 2500 финвалов. Судя по характеру распределения встреч китов вдоль хода судна, конкуренции ни внутри видов, ни между видами не прослеживается. Китам обоих видов вполне хватает запасов криля и мезозоопланктона, которые широко распределены по акватории, пусть и без образования массовых скоплений.

Численность антарктических морских котиков оценить сложнее потому, что в море этих животных увидеть сложнее, чем китов. Кроме того, в январе месяце часть этих животных еще находится на лежбищах и концентрируются у островов, и только в феврале большая часть популяции оказывается далеко в открытом море. Не является неожиданным, что результаты подсчетов разными методами для котиков варьируют сильнее, чем для горбатых китов и финвалов. Предварительно можно считать, что в акватории рассматриваемого в работе полигона находилось 2000–3000 антарктических морских котиков.

Благодарности. Авторы выражают благодарность команде НИС "Академик Мстислав Келдыш" во главе с капитаном Л.В. Сазоновым.

Источник финансирования. Работа выполнена по государственным заданиям FFER-2019-0021 и FMWE-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дикий И.В., Пекло А.М. Тюлени Аргентинских островов (Антарктика) // Сборник трудов Зоологического музея. 2012. № 43. С. 104–116.
- Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А., Тараканов Р.Ю. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019—март 2020 г.) // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1086–1088.
- 3. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825.
- 4. *Труфанова И.С.* Видовой состав и численность морских птиц и млекопитающих в Антарктической части Атлантики в декабре 2019 года—марте 2020 года // Труды АтлантНИРО. 2021. Т. 5. № 2 (12). С. 171–190.
- 5. Харитонов С.П. Компьютерная программа "Карта колонии", исполняемый файл colonmap.exe. 1999.
- Харитонов С.П. Метод "ближайшего соседа" для математической оценки распределения биологических объектов на плоскости и на линии // Вестник Нижегородского университета им Н.И. Лобачевского. Серия Биология. Вып. 1 (9). Нижн. Новгород: ННГУ, 2005. С. 213–221. http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/9999-0191_ West_bio_2005_1(9)/19.pdf.
- Харитонов С.П. Изучение пространственного распределения гнезд в колонии. Методы и теоретические аспекты исследований морских птиц // Материалы V Всероссийской школы по морской биологии (25–27 октября 2006 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2007. С. 83–104.
- Харитонов С.П., Третьяков А.В., Мищенко А.Л. и др. Наблюдения за морскими млекопитающими и птицами в Антарктике: "экологические отпечатки" распределения в океане во время 79-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. № 12. С. 1422–1438.
- Харитонов С.П., Морозов Е.Г., Третьяков А.В. и др. Пространственно-трофические связи в диадах морские птицы-планктон и морские млекопитающие-планктон в атлантическом секторе Южного океана // В печати.

- Чернецкий А.Д., Чукмасов П.В., Краснова В.В. и др. Встречаемость и распределение финвалов (Balaenoptera physalus) и горбачей (Megaptera novaeangliae) в Атлантическом секторе Антарктики // Океанология. 2023. Спец. выпуск по Антарктике.
- Шнар В.Н., Касаткина С.М. Общая характеристика исследований и основные результаты 69-го рейса СМТ "Атлантида" в антарктической части Атлантики в декабре 2019 года–марте 2020 года // Труды АтлантНИРО. 2021. Т. 5. № 2 (12). С. 13–26.
- Boyd I.L. Antarctic marine mammals // Perrin W., Wursig B., Thewissen J. (eds.). Encyclopedia of Marine Mammals, 2 Ed. Elsevier, 2008. P. 42–48.
- Clark P.J., Evans F.C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations // 1954. Ecology. V. 35. P. 445–453.
- Franeker J.A. van. Distribution and population densities of marine mammals south of 60° S // Polarforschung. 2002. V. 72. № 2/3. P. 71–74.
- Herr H., Viquerat S., Siegel V. et al. Horizontal niche partitioning of humpback and fin whales around the West Antarctic Peninsula: evidence from a concurrent whale and krill survey // Polar Biology. 2016. V. 39. P. 799–818.
- 16. Johannessen J.E.D. Within-season trends in abundance and distribution of Humpback whales (*Megaptera no-vaeangliae*) in the Antarctic Peninsula Region. Master's thesis Biology, BIO-3950. Faculty of Biosciences, Fisheries and Economics, Department of Arctic and Marine Biology. UiT The Arctic University of Norway, December 2020. 58 p.
- Kharitonov S.P. Nearest-neighbor distance method for the evaluation of distribution of different biological objects in plane or in line // Research Gate. 2015. P. 1–16. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1733.0643
- Kharitonov S.P., Tretyakov A.V., Mischenko A.L. et al. Spatial distribution, species composition, and number of marine mammals at Argentine Sea, Drake Passage, east of Antarctic Peninsula and the Powell Basin in January–March 2020 // Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology. Advances in Polar Ecology, V. 6. Springer, Cham. 2021. P. 379–398.
- Kharitonov S.P., Mischenko A.L., Konyukhov N.B. et al. Spatial distribution, species composition, and number of seabirds at Argentine Sea, Drake Passage, east of Antarctic Peninsula and the Powell Basin in January-March 2020 // Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology. Advances in Polar Ecology, V. 6. Springer, Cham. 2021. P. 355–378.
- Kharitonov S.P., Tretyakov A.V., Mischenko A.L. Meat in the ocean: how much and who is to blame? // Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds). Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology. Advances in Polar Ecology, V. 6. Springer, Cham. 2021. P. 399–408.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 63 № 4 2023

- 21. Odum E.P. Basic Ecology. Sounders College Publishing. New York-London-Toronto. 1983. V. 2. 376 p.
- 22. Secchi E.R., Dalla Rosa L., Kinas P.G. et al. Encounter rates and abundance of humpback whales (Megaptera novaeangliae) in Gerlache and Bransfield Straits, Antarctic Peninsula. Humpback Whales: Status in the Southern Hemisphere // Journal of Cetacean Research and Management. 2011. Special Issue 3 (Gales N.,

Bannister J.L., Findlay K. et al., eds). Cambridge. P. 107-112.

23. Williams R., Hedlev S. L., Hammond P.S. Modeling distribution and abundance of Antarctic baleen whales using ships of opportunity // Ecology and Society. 2006. V. 11. № 1. Art. 1. [Online]. URL: http://www.ecologvandsociety.org/vol11/iss1/art1/. 29 p.

Number of the Most Abundant Sea Mammal Species in the Vicinities of the Antarctic Peninsula. Scotia Sea and Powell Basin Area

S. P. Kharitonov^{*a*, #}, A. V. Tretvakov^{*a*}, P. V. Chukmasov^{*a*}, A. D. Chernechky^{*b*}, A. L. Mischenko^a, N. B. Konyukhov^a, A. E. Dmitriev^a, S. M. Artemyeva^c,

G. Yu. Pilipenko^d, M. S. Mamaev^a, L. G. Tretvakova^a, V. V. Rozhnov^a

^aA.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia ^bP.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia ^cZoological Museum of the M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia ^dM.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia [#]e-mail: serpkh@gmail.com

Observations were conducted from the Research Vessel "Akademik Mstislav Keldysh" in the Drake Passage, vicinities of the Antarctic Peninsula, Scotia Sea and the northern part of the Weddel Sea during two voyages in January–early March 2020 (the vessel trip number 79) and during the single voyage in January–February 2022 (trip number 87). Data allow to evaluate the number of the most abundant sea mammals in the area near South Shetland Islands, Scotia Sea and Powell Basin. Observation area of 2022 in the Antarctic were located in about 150 km eastwards of the area of 2020. The area under survey of a little bit greater than 343 th. square km in January-February 2020 held approximately 1200 Humpback Whales (Megaptera novaeangliae) and 2800 Fin Whales (Balaenoptera physalus). In 2022 this area held approximately 2500 Fin Whales and again 1200 or more amount of Humpback Whales. Numbers of the Antarctic Fur Seals in each season here assessed approximately 2000-3000 animals. Type of distribution of these two whale species along the vessel track pointed on the absence of food competition either within or between these species during Antarctic summers of 2020 and 2022. It was possible to evaluate the total numbers of the Antarctic Fur Seal (Arctocephalus gazella), however this evaluation appeared to be less precise than the same ones for Humpback Whales and Fin Whales.

Keywords: Antarctic, Humpback Whale, Fin Whale, Antarctic Fur Seal