

На правах рукописи



Кречик Виктор Антонович

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКИ И
АТЛАНТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Калининград – 2024

Работа выполнена в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник **Морозов Евгений Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Белоненко Татьяна Васильевна**, доктор географических наук, профессор кафедры океанологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Куркина Оксана Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «___» _____ 2025 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании Диссертационного совета 24.1.090.02, при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н. **Соловьев Дмитрий Александрович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Фолклендское (Мальвинское) течение (Ф/МТ), являющееся одним из главных элементов циркуляции юго-западной части Атлантического океана, в значительной степени влияет на Атлантическую меридиональную циркуляцию. Некоторые результаты численного моделирования оценивают вклад вод из Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), доставляемых Ф/МТ в верхний слой этого глобального круговорота на уровне около 50% [Piola et al., 2013]. Огромное влияние на климат Южной Америки и Юго-Западной Атлантики оказывает область повышенной динамической активности, образуемая в районе 38° ю.ш., где холодные и распресненные воды из северной части пролива Дрейка, переносимые Ф/МТ, встречаются с теплой и соленой водой Бразильского течения. Встреча масс воды с такими разными свойствами приводит к образованию большого количества вихрей и значительной модификации водных масс, вовлекаемых в процесс перемешивания [Jullion et al., 2010]. Таким образом, Ф/МТ играет ключевую роль в перераспределении тепла между океаном и атмосферой, является важным фактором повышения биопродуктивности Юго-Западной Атлантики, во многом создает термохалинный и динамический облик всей Южной Атлантики и в значительной степени определяет глобальные климатические процессы через воздействие на Атлантическую меридиональную циркуляцию [Garzoli and Matano, 2011].

Ф/МТ изучалось различными методами: по данным моделирования и реанализов океана [Artana et al., 2021, 2018b; Combes and Matano, 2014; Fetter and Matano, 2008], с применением спутниковой информации [Spadone and Provost, 2009; Vivier and Provost, 1999], по измерениям буями Argo [Artana et al., 2016] и на заякоренных станциях [Artana et al., 2018a; Ferrari et al., 2017], а также с помощью геострофических расчетов на основе гидрофизических данных [Gordon and Greengrove, 1986; Peterson, 1992; Ремесло и др., 2004]. Однако измерения SADCP, позволяющие раскрыть детали вертикальной и пространственной структуры Ф/МТ остаются довольно редкими и выполнены в основном в северной части течения [Morozov et al., 2016; Piola et al., 2013; Saunders and King, 1995].

Система течений в Атлантическом секторе Антарктики включает в себя Антарктическое прибрежное и Антарктическое склоновое течения, а также течение фронта Уэдделла. Еще одним важным элементом циркуляции является течение Брансфилда в одноименном проливе. Антарктическое прибрежное течение и Антарктическое склоновое течение, распространяющиеся на шельфе и в районе континентального склона Антарктиды, участвуют в водообмене в системе шельф-море, при этом Антарктическое склоновое течение выступает барьером, препятствующим

поступлению Теплой глубинной воды Уэдделла (ТГВ) на шельф [Thompson et al., 2018], его сила и положение контролирует формирование и перенос плотной Глубинной и Донной Воды моря Уэдделла [Gordon et al., 2010; Si et al., 2023; Stewart et al., 2019; Thompson and Heywood, 2008], из которых здесь формируется около 60% Антарктической глубинной воды [Orsi, 2002]. При этом в восточной части моря Уэдделла она не формируется вовсе [Fahrbach et al., 1994]. Течение фронта Уэдделла – важнейший элемент Атлантической меридиональной циркуляции, связанный с экспортом Глубинной воды моря Уэдделла в море Скоша [Gordon et al., 2010; Gordon et al., 2020].

Наиболее изученными регионами являются акватории пролива Брансфилда, зоны слияния морей Уэдделла и Скоша, а также район северо-восточной оконечности Антарктического полуострова. Система течений здесь исследовалась методами численного моделирования [Caspel et al., 2018; Jiang et al., 2013], на основе геострофических расчетов [López et al., 1999; Sangrà et al., 2011] и дрейферных экспериментов [Thompson et al., 2009; Thompson and Youngs, 2013; Youngs et al., 2015], а также с помощью измерений акустическими доплеровским профилографами [Heywood, 2004; Von Gyldenfeldt et al., 2002; Морозов, 2007], в том числе и судовыми [Palmer et al., 2012; Thompson and Heywood, 2008; Veny et al., 2022]. Многие из перечисленных работ выполнены на данных с невысоким пространственным разрешением, не позволяющим проследить особенности гидродинамической структуры. Также без внимания исследователей остается циркуляция в северной части бассейна Поуэлла [Azaneu et al., 2017] и в проливе Антарктика [Huneke et al., 2016].

Целью данной работы является исследование особенностей циркуляции верхнего слоя океана в Юго-Западной Атлантике и Атлантическом секторе Южного океана.

Задачи: 1) Сбор и обобщение имеющейся информации о течениях и режимообразующих факторах в районе исследования, оценка влияния факторов на поверхностную циркуляцию; 2) Разработка методических решений для формирования репрезентативного массива данных судового акустического доплеровского профилографа течений (SADCP) и их реализация в максимально простой и удобной для последующего использования форме; 3) Комплексный анализ полученной информации, выявление структурных особенностей, а также пространственной и временной изменчивости ключевых элементов циркуляции в районе исследования. Обобщение и анализ результатов.

Объект исследования: основные элементы циркуляции верхнего слоя океана толщиной около 500 м.

Предмет исследования: особенности структуры и динамики поверхностных течений в Юго-Западной Атлантике и Атлантическом секторе Южного океана.

Научная новизна. Работа построена на массиве данных контактных измерений высокого пространственного разрешения, часть из которых получена в труднодоступных районах с небольшим количеством натуральных наблюдений. Впервые для района бассейна Поуэлла выполнено описание влияния гигантского айсберга на изменчивость основных течений, определены контуры Антарктического склонового течения в районе хребта Филиппа и течения фронта Уэдделла в северной части котловины. По данным натуральных измерений скоростей течений описана и опубликована схема циркуляции в проливе Антарктика. Выявлены особенности вертикальной структуры верхней части Фолклендского (Мальвинского) течения на основе измерений с высоким разрешением вдоль его траектории от северной части пролива Дрейка до 46° ю.ш. Разработан, апробирован и применен оригинальный набор процедур обработки и фильтрации получаемых SADCР данных.

Научная и практическая значимость. Выполнено исследование течений, оказывающих значительное влияние как на региональный климат и распределение биоресурсов, так и на функционирование Атлантической меридиональной циркуляции, являющейся климатообразующим фактором планетарного масштаба. Полученные результаты, расширяя понимание гидродинамических процессов, помогут постановке и решению локальных задач изучения физических и биологических аспектов функционирования экосистем Атлантического сектора Антарктики и Юго-Западной Атлантики. В частности, в области изучения кроссшельфового водообмена в северо-западной части моря Уэдделла, являющегося основным источником Глубинной воды данного бассейна и, впоследствии, Антарктической донной воды, имеющей ключевое значение для абиссали Атлантического океана.

Результаты исследования могут быть использованы при верификации региональных моделей циркуляции. Разработанная, реализованная на языке программирования Python и использованная в работе методика фильтрации и обработки данных судового акустического доплеровского профилографа течений при внедрении в процесс экспедиционных исследований способна существенно улучшить оперативное планирование измерений при выполнении научной программы рейса.

Достоверность полученных результатов достигалась выполнением измерений современным оборудованием, калиброванным в соответствии с методиками изготовителя, а также использованием средств географического позиционирования и измерения параметров перемещения судна высокой точности. В обработке данных были

использованы обоснованные и валидированные методы, применяемые в мировой практике. Полученные результаты имеют хорошее соответствие с результатами предшествующих работ и отражают известные гидродинамические особенности района исследования.

Личный вклад автора. Автор принимал участие в экспедиционных рейсах ИО РАН и выполнял все этапы сбора, обработки, интерпретации и анализа используемых в исследовании данных. Автором была проанализирована литература по теме диссертации, разработана и реализована процедура фильтрации данных от выбросов и нерепрезентативных значений. Кроме того, автором подготовлены публикации и доклады на конференциях, отражающие результаты исследований.

Методология и методы исследования. Работа включала в себя 3 основных этапа, во многом соответствовавших поставленным задачам. На первом этапе применялись как теоретические, так и эмпирические методы. Наряду с поиском и анализом существующих научных публикаций и данных о поверхностных течениях и режимобразующих факторах в исследуемом районе, а также категоризацией полученных сведений, использовался метод измерения, заключавшийся в получении натуральных данных о параметрах течений во время двух экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш». На втором этапе, направленном на разработку алгоритмов и программных инструментов для обработки данных судового доплеровского профилографа течений, активно использовались количественные, в том числе статистические, методы. Практической реализации алгоритмов предшествовал синтез рекомендации производителя, методических наработок и результатов по фильтрации и обработке данных, опубликованных в научных статьях и технической литературе. На финальной стадии выполнялось сравнение результатов работы применяемых алгоритмов с известными характеристиками измеренных течений для оценки репрезентативности полученных данных. На третьем этапе широко использовался картографический метод – создание детализированных карт и разрезов течений, существенно упростивших выявление пространственной изменчивости поверхностных течений и их связи с географическими особенностями региона. Проводилась интерпретация данных, их сравнение с существующими теоретическими представлениями и результатами предыдущих исследований. Выполнялись систематизация и обобщение, получившие выражение в подготовке научных публикаций с изложением результатов исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые на основе прямых измерений течений верхнего слоя океана подтверждено, что Фолклендское (Мальвинское) течение разделено на две отдельно

существующих струи, распространяющихся над шельфом и континентальным склоном Южной Америки от пролива Дрейка до 46 ю.ш. Прибрежная струя характеризуется относительно стабильными скоростями течения, и расходом примерно в 5 Св. Скорости основной струи более изменчивы, ее расход составляет не менее 20 Св.

2. Антарктическое склоновое течение в северо-западной части моря Уэдделла сохраняет пространственную структуру из двух струй. Прибрежная струя пересекает хребет Филиппа через каньон примерно на 51° з.д. Мористая струя продолжает движение вдоль изобат и огибает хребет с северо-востока в районе 50° з.д.

3. Показано, что пролив Антарктика не является дополнительным путем проникновения воды моря Уэдделла в пролив Брансфилда, а представляет собой зону смешения вод этих бассейнов. В пролив Брансфилда поступает вода, являющаяся продуктом перемешивания, сформированным в этой зоне смешения.

4. Наличие айсберга с большими массой и размерами в северо-западной части моря Уэдделла в районе Антарктического склонового фронта привело к значительной перестройке структуры течений вокруг него. Струи основных течений оказались смещены на 20-50 км от континентального склона. Нехарактерные изменения динамической ситуации, вызванные гигантским айсбергом, наблюдались на протяжении всего летнего сезона.

Апробация результатов. Результаты исследования представлены на Международной научной конференции Ocean Optics XXV (Quy Nhon, Vietnam, 2022); Всероссийских конференциях: X конференция молодых учёных «Океанологические исследования» (г. Владивосток, 2023 г.) и VII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

Информация о публикациях по теме работы. По теме диссертации всего опубликовано 18 научных работ: 13 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 2 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях и 3 главы коллективной монографии в соавторстве.

Структура и объем работы. Работа включает в себя введение, три главы и заключение, содержит 165 страниц, включая 8 таблиц, 63 рисунка. Список литературы включает 225 наименований, из которых 214 – на иностранных языках.

Благодарности. В первую очередь автор выражает благодарность своему научному руководителю, Е. Г. Морозову, без участия и терпения которого, данная работа, а возможно и никакая другая, не была бы выполнена. Огромное спасибо хочется сказать Д. И. Фрею за неоценимый вклад в анализ данных, а также отдельно поблагодарить своих

коллег из ИО РАН и АО ИО РАН за поддержку, помощь, ценные советы и замечания. Автор выражает отдельную благодарность Р.Ю. Тарakanову за полезные замечания и конструктивную критику, которая помогла сделать эту работу лучше.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** охарактеризована актуальность темы исследования, определены цель и задачи, дана оценка научной новизны и практической значимости исследования, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** выполнено описание района исследования, выявлен ряд ключевых элементов циркуляции верхнего слоя водной толщи в изучаемых акваториях и выполнен обзор актуального состояния их исследований. Проведен анализ основных режимобразующих факторов, определяющих современное состояние, функционирование и изменчивость систем течений в Атлантическом секторе Антарктики и Юго-Западной Атлантике. Выявлено значительное комплексное влияние на поверхностную циркуляцию района исследования основных режимобразующих факторов. Влияние топографии дна выражается не только в ограничении водообмена района исследования с глобальным Антарктическим циркумполярным течением, но и в наличие обширных шельфовых областей, а также стабилизирующем влиянии континентального склона как в Юго-Западной Атлантике, так и в бассейне моря Уэдделла. Антарктическое и Южное колебания – основные режимы циркуляции атмосферы в Южном полушарии, регулируя пространственную и временную изменчивость поля ветра, оказывают значительное влияние на интенсивность планетарных динамических структур: круговорота моря Уэдделла и АЦТ. Совместное действие этих факторов вкупе с термохалинными особенностями как самих течений, так и окружающих вод порождает большое количество региональных эффектов, отражающихся на изменчивости физических характеристик основных течений.

В **Главе 2** описываются использованные в работе материалы и методы. Представлено описание процесса формирования репрезентативного массива данных, на основе которого выполнялась данная работа. В начале **раздела 2.1** приведена информация о характеристиках приборов и процедуре сбора данных. Далее изложена методика фильтрации и обработки данных судового акустического доплеровского профилографа течений (SADCP), разработанная с учетом замечаний специалистов в научной и инженерной литературе, а также рекомендаций производителей данного оборудования. В заключительной части раздела описана компенсация воздействия на течения

баротропного прилива и представлены результаты оценки качества работы четырех приливно-отливных моделей в условиях узких проливов, отмелого шельфа и высокой концентрации льда, совокупность которых существенно осложняет корректный модельный расчет. В **разделе 2.2** перечислены дополнительные источники информации, использованные в исследовании, и их характеристики. Используемый в работе массив данных был дополнен измерениями судовых акустических доплеровских профилографов течений из рейсов НИС «Polarstern» и судов Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. К анализу привлекались данные о термохалинной структуре вод в районе исследования (гидрофизические зондирования и попутные измерения термосоленографом). Также использовалась информация дистанционного зондирования Земли (спутниковые данные о возвышении уровня, изображения, полученные с помощью радара с синтезированной апертурой и спутниковые цветосинтезированные снимки оптического диапазона).

Глава 3 диссертации посвящена выявлению, описанию и анализу специфических черт динамической структуры основных элементов циркуляции акваторий, выбранных в качестве районов исследования. **Раздел 3.1** раскрывает пространственные особенности и изменчивость переноса Фолклендского (Мальвинского) течения. Исследование течения по данным наблюдений SADCР на пяти разрезах показало, что основной особенностью структуры скорости течения является наличие двух ветвей. Две струи наблюдались на всех разрезах над шельфом и континентальным склоном Южной Америки от пролива Дрейка до 46 ю.ш. (рисунок 1). Береговая ветвь течения характеризуется относительно стабильными скоростями вдоль течения, достигающими 60–80 см/с, она вплотную следует изобатам 200–300 м. Ее расход был оценен примерно в 5 Св. Скорость основной ветви более изменчива вдоль пути течения. Она может превышать значения в 90 см/с в северной части пролива Дрейка и 70 см/с на 46° ю.ш. в западной части Аргентинской котловины. В то же время над плато Фолкленд (Мальвинас) скорость уменьшается (57–63 см/с). Эти пространственные изменения поверхностных скоростей подтверждаются данными спутниковой альтиметрии. Расход основной струи, располагающейся преимущественно над изобатой 1500 м, варьирует от 21 до 25 Св.

В **разделе 3.2** приводятся результаты исследования взаимодействия субтропических и субантарктических вод в юго-западной части Атлантического океана – одном из самых динамичных районов океана, где наблюдается большое количество вихревых структур различных размеров.

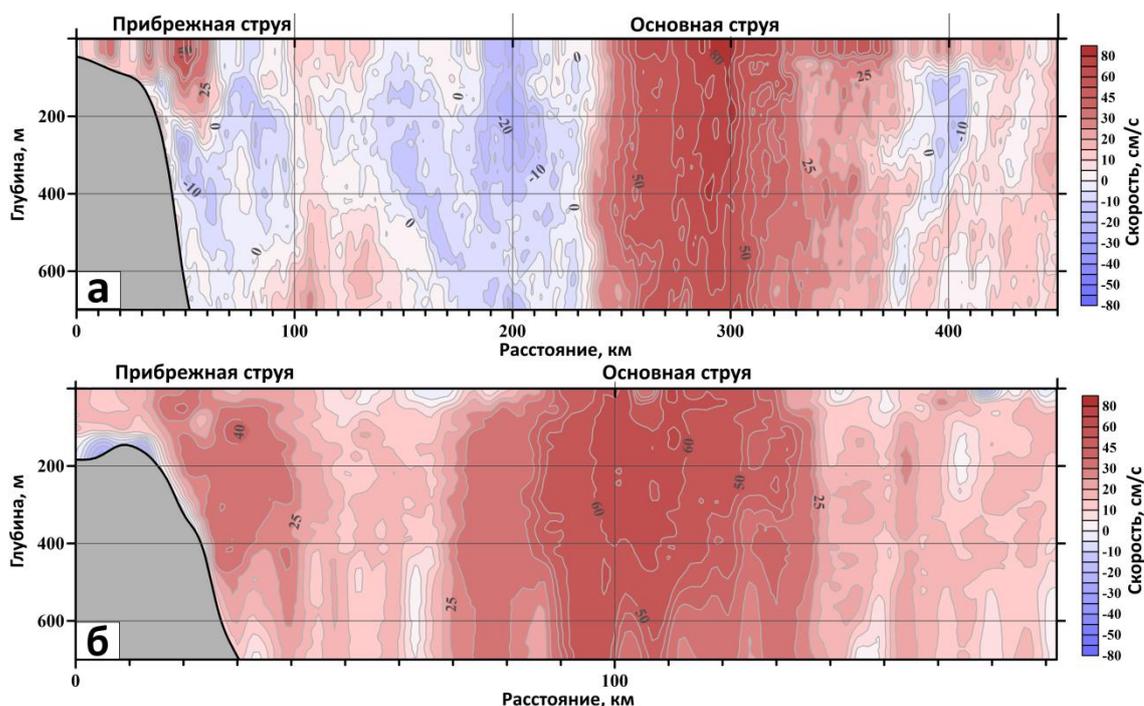


Рисунок 1 – Разрезы скоростей течений, выполненные в северной части пролива Дрейка (а) и вблизи 46° ю.ш. (б)

В 87-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» было выполнено исследование изменений свойств вод субтропического и субантарктического происхождения, при взаимодействии антициклонического и циклонического вихрей, в которых они наблюдались. Предварительно вихри наблюдались по данным спутниковой альтиметрии в течение месяца. Затем для изучения вертикальной структуры вихрей по результатам спутниковых наблюдений были выбраны два расположенных рядом круговорота циклонического и антициклонического вращения, в которых были выполнены судовые измерения. Наблюдения показали, что в среднем в исследованной области наблюдалось 32 вихря ежедневно. Вихри по знаку вращения распределялись примерно поровну. Этот результат хорошо согласуется с работой [Mason et al., 2017]. Антициклонический вихрь из наблюдаемой пары показал устойчивое смещение и относительное постоянство своих характеристик. Он был крупнее и вращался быстрее циклона. Циклоническая структура была более изменчива в период наблюдений и двигалась преимущественно в поперечном Субтропическому фронту направлении, иногда сливаясь с фронтом на срок до 4 суток.

Судовые измерения показали, что вертикальная структура вихрей демонстрирует существенную пространственную неоднородность как термохалинных и динамических характеристик, так и гидрохимических показателей. К зоне взаимодействия вихрей приурочены области высокоскоростных струй со значениями скорости, превышающими

80 см/с. При этом струи внешней периферии вихревой пары движутся заметно медленнее. Ядра периферийных струй холодного циклонического вихря располагаются на поверхности, в то время как ядра антициклона заглублены и находятся в диапазоне глубин от приблизительно 100 до 300–400 м. Контактные измерения течений также подтвердили спутниковые наблюдения и показали, что циклоническая структура вращается с меньшей скоростью, чем антициклоническая. Высокие скорости течений в области взаимодействия вихрей вблизи фронтального раздела способствуют интенсивному перемешиванию и трансформации водных масс, о чем свидетельствуют повышенные значения кислорода и биогенных элементов на внешней периферии антициклона.

В разделе 3.3 изложены особенности циркуляции вод Атлантического сектора Южного океана. Он содержит результаты исследований траектории и структуры Антарктического склонового течения (АСТ) южнее хребта Южный Скоша, а также динамики вод в проливах Брансфилда и Антарктика.

Первая часть раздела описывает результаты изучения конфигурации и параметров АСТ в северо-западной части моря Уэдделла. Результаты предыдущих исследований выявили сложную комплексную структуру этого течения из двух струй южнее о. Жуэнвиль [Thompson and Heywood, 2008]. Выполненные во время антарктических рейсов АМК 79 и АМК 87 разрезы скоростей течений позволили отследить траекторию движения АСТ вдоль восточного склона Антарктического полуострова в районе о. Жуэнвиль, южной и северо-восточной оконечности хребта Филиппа, а также в районе входа потока в разлом Хесперидес. Измерения показали наличие двух струй в структуре АСТ, как было описано в [Thompson and Heywood, 2008] для района юго-западнее хребта Жуэнвиль. При пересечении данного хребта и следовании вдоль склона Антарктического полуострова в генеральном северном направлении, а также при слиянии с Антарктическим прибрежным течением на узком шельфе восточнее о. Жуэнвиль с последующим их разделением течение принципиально не меняет своей структуры. В слиянии участвует только прибрежная струя (АСТ(п)), которая движется в районе бровки шельфа над изобатами 800–1000 м. Мористая струя (АСТ(м)) отстоит от бровки шельфа на 30–40 км и движется над изобатами 1600–2000 м. При этом положение ядра АСТ(м) часто привязано к локальным изменениям крутизны склона (рисунок 2). АСТ сохраняет свою двухструйную структуру примерно до 51° з.д., где более мелководная АСТ(п) отделяется, совершая поворот на север через узкий каньон с крутыми склонами. АСТ(м) также поворачивает в этот каньон, но рециркулирует, не преодолевая крутой порог, прижимается к материковому склону и продолжает движение на восток, где пересекает изобаты в районе

50° з.д. на широком участке с пологим склоном. Далее, обогнув хребет Филиппа с северо-востока она движется на запад, встречается с АСТ(п) и они, повернув на север, входят в разлом Хесперидес. Выполненная мезомасштабная гидрофизическая съемка показала, что АСТ(м) является важным источником ТГВ в западной части хребта Южный Скоша, а также переносит в этот район воду с большим, относительно окружающей акватории, содержанием фито- и зоопланктона, увеличивая биопродуктивность. Кроме того, большое пространственное разрешение разрезов позволило зафиксировать струю течения фронта моря Уэдделла (ТФУ), таким образом инструментально подтвердив теоретические траектории этого течения в северной и северо-западной частях котловины Поуэлл, приведенные авторами работы [Azaneu et al., 2017].

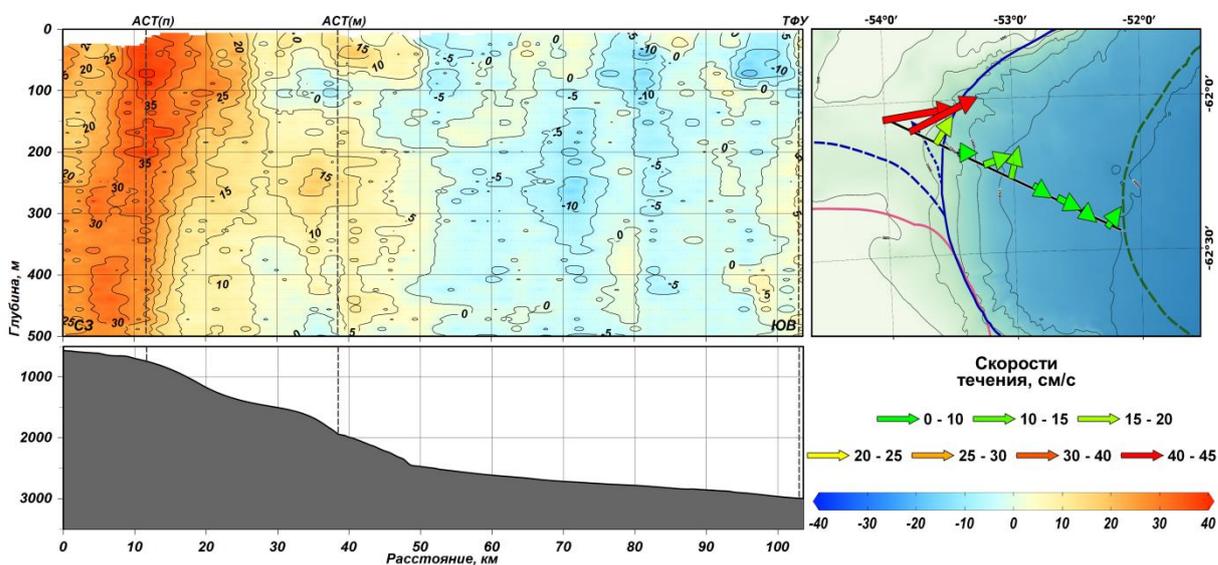


Рисунок 2 – Разрез поперек материкового склона в западной части хребта Филиппа. Выполнен 2 февраля 2022 г. (рейс АМК 87). Сверху отмечены 2 струи АСТ: прибрежная АСТ(п) и мористая АСТ(м), а также струя течения фронта моря Уэдделла (ТФУ). Справа от разреза приведена карта со средними по глубине векторами течений

Во второй части раздела представлено исследование водообмена между морем Уэдделла и проливом Брансфилда через пролив Антарктика, который остается одним из наименее исследованных мест северо-восточной части Антарктического полуострова. Результаты анализа спутниковых данных и контактных измерений показали наличие циклонической циркуляции в проливе Антарктика, а также присутствие здесь воды из шельфовых районов моря Уэдделла и пролива Брансфилда. Поступление воды в пролив Антарктика происходило как с юга, так и с севера. Выход воды по данным SADCР также наблюдался в обе стороны, но преимущественно в южном направлении. Сочетание этих

факторов привело к образованию обширной зоны перемешивания внутри пролива. Ядро этой зоны находилось в районе перехода от глубоководной части пролива к мелководной. Здесь к основной зоне взаимодействия вод пролива Брансфилд с водами моря Уэдделла присоединяется вдольбереговое течение, отрывающееся от побережья Антарктического полуострова. Вода из моря Уэдделла и пролива Брансфилда наблюдалась на крайних южной и северной станциях соответственно. Водная толща в центральной части пролива Антарктика в диапазоне глубин 0–200 м представляла собой продукт перемешивания этих двух типов воды в разном объемном соотношении. Схема зоны перемешивания представлена на рисунке 3.

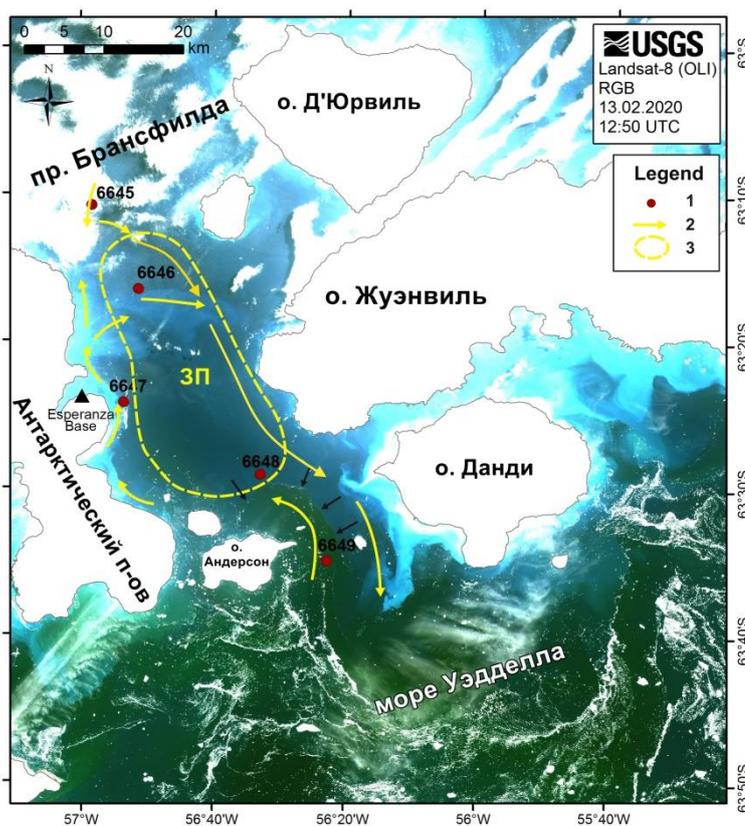


Рисунок 3 – Схема циркуляции и зоны перемешивания (ЗП) в проливе Антарктика 13.02.2020. Красными точками отмечены станции, желтые стрелки показывают поверхностную циркуляцию в проливе, желтая штриховая линия обозначает зону перемешивания, черные стрелки указывают на фронтальную зону в южной части пролива

Третья часть раздела описывает структуру и динамику течений в проливе Брансфилда. Измерения SADCР подтвердили общие аспекты циркуляции в проливе, известные из предыдущих исследований. В западной части пролива течение Брансфилда (ТБ) наблюдается южнее острова Десепшн, а вокруг этого острова установлено наличие антициклонической циркуляции. ТБ разгоняется вдоль Южных Шетландских островов (ЮШО) и максимальная скорость, достигающая 50 см/с, наблюдается южнее острова

Кинг-Джордж на долготе $58^{\circ}45'$ з. д. Далее на восток течение замедляется, поворачивает к северу и распространяется дальше вокруг ЮШО или продолжает движение до островов Мордвинова (Элефант) и Шишкова (Кларенс). Поле скоростей, наблюдаемое на нескольких разрезах между ЮШО и островом о. Мордвинова, несколько отличается от опубликованных ранее результатов [Sangrà et al., 2017]. ТБ заглубляется и становится более изменчивым в этом месте. Скорости здесь могут превышать 80 см/с, что выше, чем в центральной котловине. О таких высоких скоростях не сообщалось ранее. Антарктическое прибрежное течение (АПТ), несущее воды моря Уэдделла вдоль Антарктического полуострова, распространяется в глубинных слоях из-за их высокой плотности и этот поток обычно не наблюдается на поверхности. Ядро течения располагается на глубине 200 м вблизи бровки шельфа. Этот поток распространяется по всей длине пролива и наблюдается до острова Тринити. Ранее предполагалось, что все воды моря Уэдделла рециркулируют в пределах центрального бассейна пролива. Оценка воспроизводимости течений по данным спутниковой альтиметрии в узком проливе показала, что она раскрывает пространственную структуру ТБ, однако АПТ, наоборот, четко не представлено в анализируемых полях геострофической скорости, полученных со спутников. Причиной этого является значительное заглубление его ядра. В целом, высокой корреляции между геострофической и натурной скоростями течений, характерной для открытых районов океана, в проливе Брансфилда обнаружено не было. Однако эти данные могут быть полезны для оценок многолетних вариаций интенсивных течений в этом районе.

Раздел 3.4 посвящен непериодической изменчивости течений в северо-западной части моря Уэдделла, вызванной дрейфом гигантского айсбергом А68А. В декабре – феврале 2020 г. А68А находился вблизи северо-восточной оконечности Антарктического полуострова (рисунок 4), где в это время выполнялась научная программа 79-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Это позволило выполнить натурные измерения в непосредственной близости от айсберга. Для исследования взаимодействия А68А с пространственной структурой течений был выполнен совместный анализ перемещений гигантского айсберга А68А и окружающих его малых айсбергов по данным спутниковых снимков радара с синтезированной апертурой, а также данным SADCР. Это позволило выявить особенности динамики струй основных течений в районе о. Жуэнвиль при их взаимодействии с гигантским айсбергом летом Южного полушария в 2019–2020 гг. Как показали наблюдения, наличие гигантского айсберга в северо-западной части моря Уэдделла в районе Антарктического Склонового фронта привело к значительной перестройке структуры течений вокруг А68А.

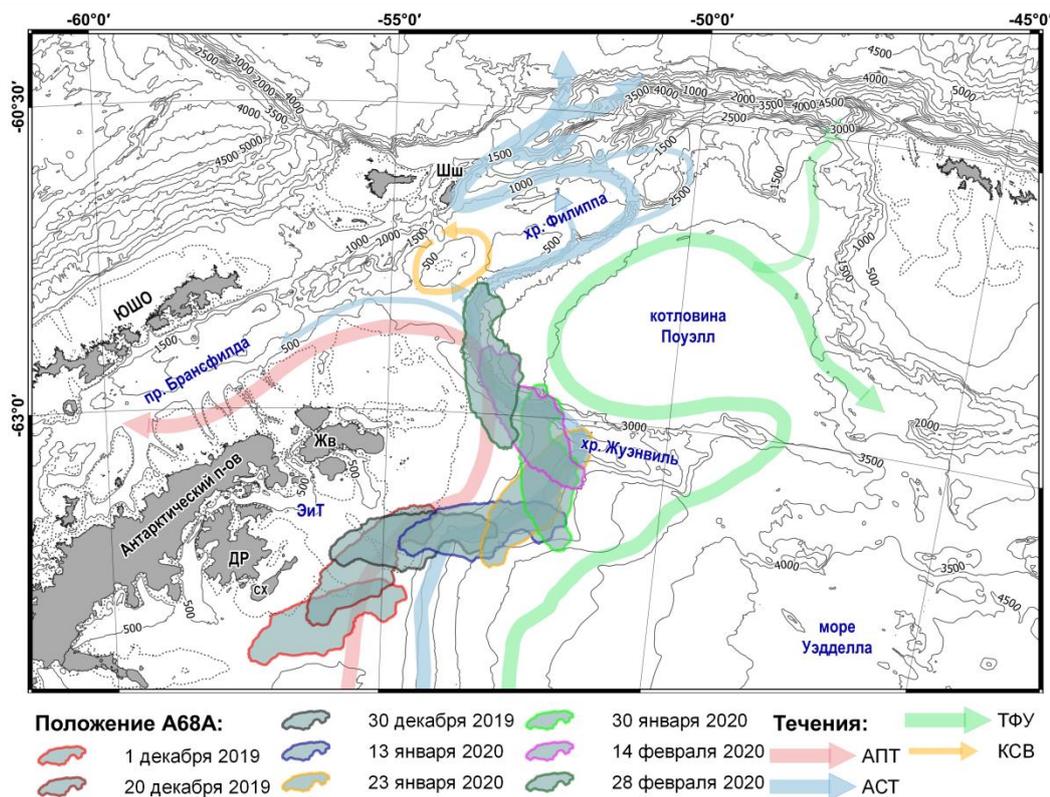


Рисунок 4 – Дрейф айсберга А68А с 1 декабря 2019 г. по 28 февраля 2020 г. по спутниковым данным. Цветными линиями показана схема основных течений согласно [Azaneu et al., 2017; Heywood, 2004; Thompson et al., 2009; Thompson and Heywood, 2008; Thompson and Youngs, 2013; Youngs et al., 2015; Zhou et al., 2006; Zhou et al., 2013]. АПТ – Антарктическое прибрежное течение; АСТ – Антарктическое склоновое течение; ТФУ – Течение фронта моря Уэдделла; КСВ – квазистационарный вихрь по данным [Thompson et al., 2009]. ЮШО – Южные Шетландские о-ва; ШШ – о. Шишкова; ЖВ – о. Жуэнвиль; ДР – о. Джеймса Росса; СХ – о. Сноу-Хилл; ЭИТ – залив Эребус и Террор. Изобаты (черные сплошные линии) проведены через 500 м. Пунктирной линией обозначена изобата 300 м

Струи основных течений оказались смещены на 20–50 км от континентального склона. Исходя из траекторий дрейфа некоторых айсбергов, с большой долей вероятности, можно предположить, что во второй половине февраля ТФУ не заходило в бассейн Поуэлл. Описанные изменения наблюдались на протяжении летнего периода Южного полушария (с начала декабря 2019 г. по конец февраля 2020 г.). Таким образом, присутствие гигантского айсберга больших размеров и массы, который стал препятствием для обычного расположения струй основных течений, привело к нехарактерной изменчивости динамической ситуации не только в районе исследования, но и в ближайших акваториях в сезонном масштабе времени.

В Заключении сформулированы основные выводы исследования:

Режимообразующие факторы оказывают значительное комплексное влияние на поверхностную динамику северо-западной части моря Уэдделла и Юго-Западной

Атлантики. Их совокупное воздействие приводит к проявлению как локальной специфики основных региональных течений, так и к временной перестройке глобальных элементов циркуляции;

Основной структурной особенностью Фолклендского (Мальвинского) течения является наличие двух ветвей: основной и береговой, существующих на всем протяжении течения, вплоть до 46° ю.ш. Береговая ветвь более стабильна и перемещается вдоль изобат 200–300 м со скоростью до 60–80 см/с. Основная ветвь располагается дальше по склону, двигаясь вдоль изобат 1400–1500 м. Ее скорость более изменчива и может достигать 70–90 см/с, а перенос примерно в 5 раз выше, чем у береговой ветви;

Вихри, образованные рингами, отделившимися от Бразильского и Фолклендского (Мальвинского) течений в зоне их слияния, характеризуются наличием в области взаимодействия двух вихрей высокоскоростных струй, двигающихся со скоростью до 80 см/с. При этом ядра периферийных струй циклона находятся на поверхности, а ядра антициклонического вихря располагаются на глубине 100–400 м;

Антарктическое склоновое течение имеет двухструйную структуру и сохраняет ее при движении вдоль северо-западного склона котловины Поуэлл до 51° з.д., где прибрежная ветвь отделяется и пересекает хребет Филиппа. Мористая струя продолжает движение вдоль хребта на восток и огибает его в районе 50° з.д., перенося в этот район Теплую Глубинную Воду из моря Уэдделла и образуя сильный гидрологический фронт с холодными водами, расположенными над хребтом Филиппа;

В проливе Антарктика по спутниковым и контактными данным наблюдается циклоническая циркуляция. Вода, поступающая в пролив как из пролива Брансфилда, так и из моря Уэдделла, образует обширную зону перемешивания, чему способствует чашеобразная форма дна;

В проливе Брансфилда плотные воды из моря Уэдделла распространяются в глубоких слоях. Ядро течения обычно располагается на глубине 200 м над бровкой шельфа. Скоростное ядро течения Брансфилда, напротив, расположено у поверхности. Анализ спутниковой альтиметрии в воспроизведении течений в условиях узкого пролива показал, что эта информация может быть использована для выявления закономерностей средней циркуляции в пределах пролива. Однако данные суточной альтиметрии показывают значительные расхождения с натурными данными и требуют контактных измерений для изучения структуры течений в проливе;

Появление шестого по размеру за всю историю спутниковых наблюдений айсберга А68А в западной части моря Уэдделла привело к масштабной перестройке динамической структуры, наблюдавшейся на протяжении не менее 3 месяцев.

Практическое применение результатов диссертации возможно при изучении поверхностных течений по данным спутниковой альтиметрии в узких проливах и областях с повышенной концентрацией льда вблизи Антарктического полуострова, верификации моделей, изучении перемещения Антарктического криля (*Euphausia superba*) в северо-западной части моря Уэдделла, а также исследованиях фронтальных зон и биопродуктивности в районе шельфа Патагонии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Krechik V.A.** The upper layer of the Malvinas/Falkland current: Structure, and transport near 46°S in January 2020 // Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 20. – № 5. – P. 1–8. doi:10.2205/2020ES000715

2. Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Полухин А.А., **Кречик В.А.**, Артемьев В.А., Гавриков А.В., Касьян В.В., Сапожников Ф.В., Гордеева Н.В., Кобылянский С.Г. Мезомасштабная изменчивость океана в северной части моря Уэдделла // Океанология. – 2020. – Т. 60. – № 5. – С. 823–825. doi: 10.31857/S0030157420050184

3. Morozov E.G., Frey D.I., Fofanov D.V., **Krechik V.A.**, Tarakanov R.Yu., Vinokurov D.L. The extreme northern jet of the Antarctic Circumpolar Current // Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 20. – № 5. – P. 1–6. doi:10.2205/2020ES000717

4. **Кречик В.А.**, Фрей Д.И., Морозов Е.Г. Особенности циркуляции вод в центральной части пролива Брансфилда в январе 2020 г. // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496. – № 1. – С. 101–105. doi: 10.31857/S2686739721010114

5. Морозов Е.Г., **Кречик В.А.**, Фрей Д.И., Замшин В.В. Течения в западной части моря Уэдделла и дрейф большого айсберга А68А // Океанология. – 2021. – Т. 61. – № 5. – С. 677–689. doi: 10.31857/S0030157421050099

6. Morozov E.G., Zuev O.A., Zamshin V.V., **Krechik V.A.**, Ostroumova S.A., Frey D.I. Observations of icebergs in Antarctic cruises of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – V. 22. – № 2. – P. 1–5. doi: 10.2205/2022ES000788

7. Мухаметьянов Р.З., Селиверстова А.М., Морозов Е.Г., Фрей Д.И., **Кречик В.А.**, Зуев О.А. Гидрологическая структура и динамика вод в бассейне Пауэлла в январе – феврале 2022 г. // Океанология. – 2023. – Т. 63. – № 4. – С. 548–563. doi: 10.31857/S0030157423040147

8. Зуев О.А., Фрей Д.И., Дрозд И.Д., **Кречик В.А.** Пространственная и временная изменчивость термохалинной структуры вод в проливе Антарктика // *Океанология*. – 2023. – Т. 63. – № 4. – С. 526–538. doi: 10.31857/S0030157423040184

9. Frey D.I., Piola A.R., **Krechik V.A.**, Fofanov D.V., Morozov E.G., Silvestrova K.P., Tarakanov R.Yu, Gladyshev S.V. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2021. – V. 126. – № 4. – P. 1–20. doi: 10.1029/2020JC016727

10. Morozov E.G., Frey D.I., **Krechik V.A.**, Latushkin A.A., Salyuk P.A., Seliverstova A.M., Mosharov S.A., Orlov A.M., Murzina S.A., Mishin A.V., Chukmasov P.V., Kubryakov A.A., Budyansky M.V., Zuev O.A., Mekhova O.S., Ponomarev V.I., Chultsova A.L., Masevich A.V., Torgunova N.I., Kholmogorov A.O., Shtraikhert E.A., Mosharova I.V., Neretin N.Y., Kolbasova G.D., Syomin V.L., Tretiakov A.V., Tretiakova L.G., Chernetsky A.D. Multidisciplinary observations across an eddy dipole in the interaction zone between subtropical and Subantarctic waters in the Southwest Atlantic // *Water MDPI*. – 2022. – V. 14. – P. 1–21. doi: 10.3390/w14172701

11. Salyuk P.A., Mosharov S.A., Frey D.I., Kasyan V.V., Ponomarev V.I., Kalinina O.Yu., Morozov E.G., Latushkin A.A., Sapozhnikov P.V., Ostroumova S.A., Lipinskaya N.A., Budyansky M.V., Chukmasov P.V., **Krechik V.A.**, Uleysky M.Yu., Fayman P.A., Mayor A.Yu., Mosharova I.V., Chernetsky A.D., Shkorba S.P., Shved N.A. Physical and biology features of the waters in the outer Patagonian Shelf and the Malvinas Current // *Water MDPI*. – 2022. – V. 14. – P. 1–34. doi: 10.3390/w14233879

12. Frey D.I., **Krechik V.A.**, Gordey A.S., Gladyshev S.V., Churin D.A., Drozd I.D., Osadchiev A.A., Kashin S.V., Morozov E.G., Smirnova D.A. Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCOP measurements and satellite altimetry // *Frontiers in Marine Science*. – 2023. – V. 10. – P. 1–21. doi: 10.3389/fmars.2023.1111541

13. Gordey A.S., Frey D.I., Drozd I.D., **Krechik V.A.**, Smirnova D.A., Gladyshev S.V., Morozov E.G. Spatial variability of water mass transports in the Bransfield Strait based on direct current measurements // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2024. – V. 207. – P. 1–15. doi: 10.1016/j.dsr.2024.104284

Тезисы докладов на российских и международных научных конференциях:

14. Мухаметьянов Р.З., **Кречик В.А.**, Фрей Д.И. Пространственная структура вод в северо-западной части моря Уэдделла // *Океанологические исследования: материалы X конференции молодых ученых, 24–28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия*. – 2023. – С. 50–51.

15. Фрей Д.И., **Кречик В.А.**, Гордей А.С. Пространственная структура течений в проливе Брансфилда по данным натуральных наблюдений // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых учёных, г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г. – 2023. – С. 196–197.

Главы в коллективной монографии:

16. Morozov E.G., **Krechik V.A.**, Frey D.I., Polukhin A.A., Artemiev V.A., Kasyan V.V., Sapozhnikov Ph.V., Mukhametianov R.Z. Frontal zone between relatively warm and cold waters in the Northern Weddell Sea // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean: Oceanography and Ecology Advances in Polar Ecology / eds. E. G. Morozov, M. V. Flint, V. A. Spiridonov. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 31–54. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_3

17. Morozov E.G., Frey D.I., **Krechik V.A.**, Polukhin A.A., Sapozhnikov Ph.V. Water masses, currents, and phytoplankton in the Bransfield Strait in January 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean: Oceanography and Ecology Advances in Polar Ecology / eds. E. G. Morozov, M. V. Flint, V. A. Spiridonov. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 55–64. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_4

18. 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: Oceanography and Ecology Advances in Polar Ecology / eds. E. G. Morozov, M. V. Flint, V. A. Spiridonov. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 83–99. doi: 10.1007/978-3-030-78927-5_6