

КОМПЛЕКСНЫЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД С БОРТА НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ» В РАМКАХ 69-Й РАЭ

Основным объектом океанографических исследований с борта НЭС «Академик Трёшников» в рамках сезонной 69-й РАЭ являлся пролив Брансфилд (ПБ), расположенный в Южном океане между Антарктическим полуостровом и Южными Шетландскими островами. Воды в этом районе имеют сложную и изменяющуюся во времени и пространстве структуру. Она определяется взаимодействием вод из Антарктического циркумполярного течения и морей Беллинсгаузена и Уэдделла. Поскольку район пролива Брансфилд испытывает влияние нескольких акваторий, изменение свойств водных масс и структуры вод в целом в проливе может рассматриваться как индикатор процессов и изменений, происходящих в этих акваториях. С гидробиологической точки зрения пролив Брансфилд представляет интерес как район Южного океана с высокой продуктивностью вод. Поэтому проведение ежегодных исследований на регулярном разрезе в проливе Брансфилд является одной из основных научных целей как программы океанографических работ, так и программ гидрохимических и гидробиологических работ, реализуемых в рамках сезонных операций РАЭ.

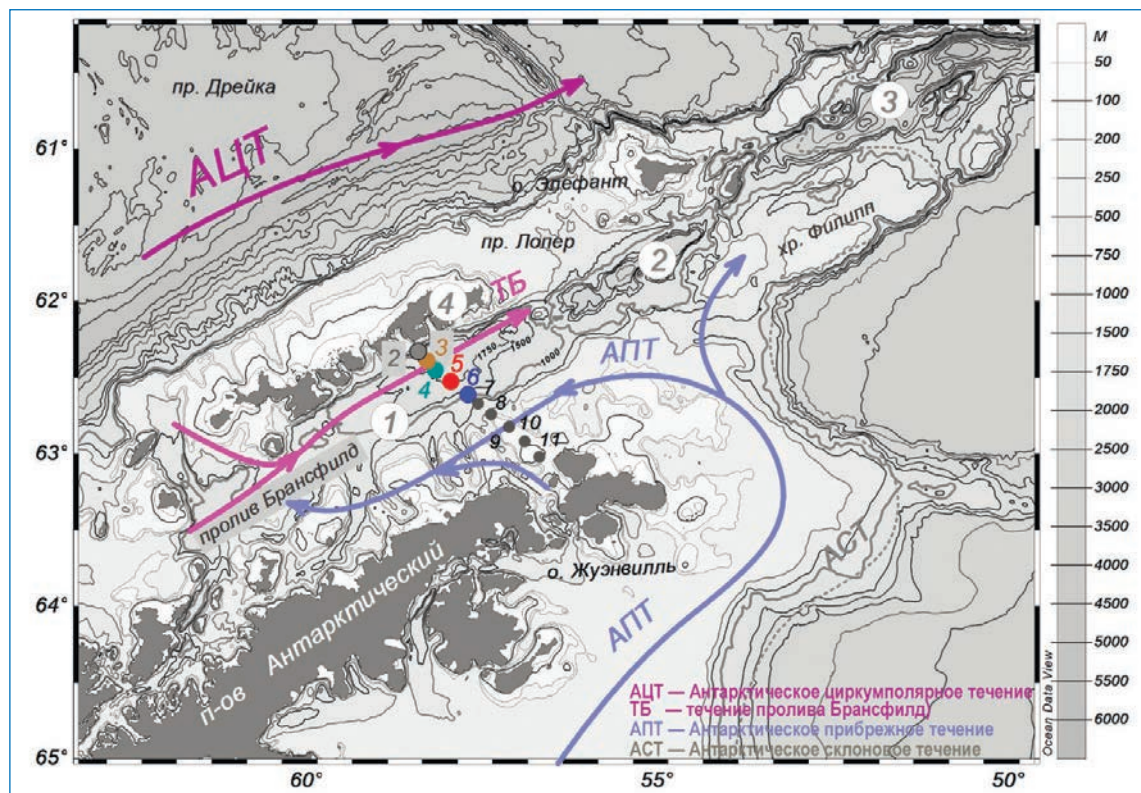
В период с 1 по 2 июня 2024 года с борта НЭС «Академик Трёшников» впервые в рамках РАЭ проведено комплексное океанографическое исследование на регулярном разрезе в проливе Брансфилд (рис. 1), включавшее в себя не только глубоководное зондирование с отбором гидрохимических проб, но и гидробиологические исследования, а также исследования течений с помощью бор-

тового акустического доплеровского профилографа скорости течений (SADCP). Нужно отметить, что разрез через Центральную котловину пролива регулярно выполняется в рамках РАЭ с 2016 года. Разрез состоит из 11 станций на протяжении 120 км. Расстояние между станциями на разрезе варьируется от 7–8 км в районе бровки шельфа на северном и южном краях до 18 км в центральной части.

Вследствие отставания от графика движения НЭС «Академик Трёшников» и необходимости выполнения логистических задач по обеспечению российской антарктической станции Беллинсгаузен, было принято решение о частичном выполнении разреза в два этапа. Во время первого этапа были выполнены станции 2, 3, 4, после чего судно вернулось в район станции Беллинсгаузен для завершения погрузочных работ. Второй этап работ на научной станции судно вышло на станцию 5, продолжив океанографические исследования. На станции 6 ветровое волнение усилилось до 5 м, отмечались отдельные скопления блинчатого льда. При подходе к станции 7 ветер усилился до 16–18 м/с, высота зыби составила 3 м, также наблюдался сплошной блинчатый лед. Ввиду неблагоприятных метеоусловий и сложной ледовой обстановки было принято решение об отмене станции. Из пяти станций разреза четыре были выполнены на открытой воде, на станции 5 уже наблюдался блинчатый лед. На рис. 1 представлена карта-схема района исследования с обозначенными номерами станций на разрезе.

Рис. 1. Карта-схема района расположения океанографических станций на разрезе.

Цветными точками обозначены станции, выполненные в рамках 69-й РАЭ, темно-серыми точками обозначено расположение запланированных, но не выполненных станций на разрезе. Цифрами в кружках обозначены: 1 — Центральная котловина, 2 — Восточная котловина; 3 — проход Гесперид, 4 — Южные Шетландские острова



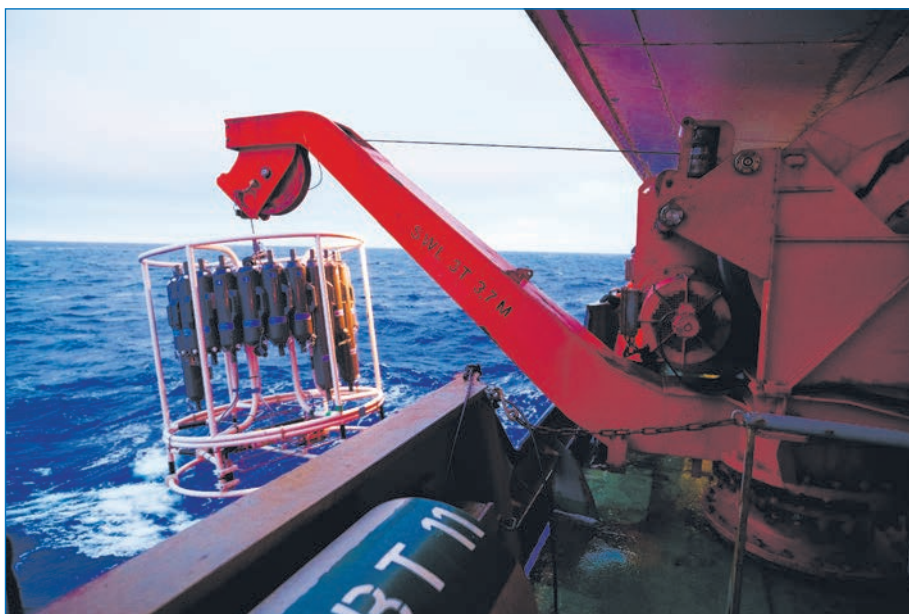


Рис. 2. Выполнение океанографической станции с помощью зондирующего комплекса в проливе Брансфилд

Таким образом, комплексное исследование включало измерения термохалинных и гидрохимических характеристик на 5 океанографических станциях до дна в глубоководной части разреза (станции 2–6 согласно нумерации станций, принятой в рамках океанографической программы Лаборатории Южного океана ААНИИ на регулярном разрезе), отбор проб на содержание хлорофилла «а» (хл-А) в верхнем 100-метровом слое, отбор проб для исследования видового состава фито- и зоопланктонных сообществ и 3 поперечных разреза, выполненных SADCP TRDI OS75 Ocean Surveyor 75 kHz. Океанографические станции выполнялись зондирующим комплексом, состоящим из CTD-зонда (Conductivity, Temperature, Depth) SBE 911 plus, альтиметра и 24 батометров, закрепленных на пробоотборном комплексе карусельного типа.

На каждой станции выполнялся отбор проб на стандартных горизонтах и локальных экстремумах термохалинных характеристик на содержание кремния, фосфатов, нитритов, щелочности, аммония. Гидробиологические пробы отбирались с поверхности и в слоях экстремумов (рис. 2). Отбор проб для измерения концентрации хл-А производился на горизонтах 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 м. Лов зоопланктона для определения видового состава фито- и зоопланктонного сообщества осуществлялся с помощью иктиопланктонной сетки ИК-80 на горизонте 100–0 м.

При проведении всех гидрохимических определений использовались стандартные методики и реактивы, принятые в морской химии. Растворенный кислород определялся по методу Винклера в модификации А.М. Черняковой титрованием пробы 0,02 Н раствором тиосульфата натрия. Определение растворенного кремния при концентрациях более 50 μM производилось по методу Королева. Оптическая плотность измерялась при длине волны 380 нм. При концентрациях менее 50 μM использовался метод, основанный на восстановлении в кислой среде кремниевой гетерополиокислоты до кремнемолибденового комплекса голубого цвета. Определение содержания фосфора, растворенного в морской воде, производили по методу Морфи–Райли. Определение аммонийного азота было проведено по методу Сэджи–Солорзано. Определение нитритного азота про-

изводили по методу Бендшнайдера и Робинсона. Концентрации растворенного кремния, минерального фосфора, аммонийного и нитритного азота определялись на спектрофотометре Shimadzu UV-1800. Определение общей щелочности осуществляли титриметрическим методом согласно РД 52.10.743-2010. Определение показателя pH производилось с помощью прибора “HANNA instruments”.

Концентрация хл-А определялась флуориметрическим методом. Проба воды (1 л) фильтровалась на стекловолокнистом фильтре марки GF/F, размер пор 47 мм. Хлорофилл экстрагировался из фильтра 90 % ацетоном (объем 5 мл) в течение 30 минут в темном прохладном месте. Затем с помощью флуориметра Trilogy (Turner Designs) определялась концентрация.

Предварительные результаты исследования термохалинной и гидрохимической структуры вод получены прежде всего на основе анализа вертикальных распределений и θ , S-диаграмм (θ — потенциальная температура, S — соленость). Для идентификации водных масс в толще использовался метод ядра, который позволяет выделить ядра водных масс по экстремумам термохалинных и гидрохимических характеристик.

Измерения течений велись SADCP TRDI OS75 Ocean Surveyor 75 kHz, установленным на борту НЭС «Академик Трёшников», в режиме Narrowband, который обеспечивает максимальную глубину измерений. Вертикальное разрешение ячейки составляло 16 м. Прибор был заглублен на 5,8 м, значение слепой зоны было равно половине величины ячейки (8 м). Такая настройка позволила получать данные хорошего качества в диапазоне глубин от 24 до 500–800 м в зависимости от количества рассеивателей акустического сигнала в воде, ледовой и погодной обстановки. Точность измерения скорости течений составляла 1 % от измеренной скорости $\pm 0,5$ м/с. Первичная обработка данных SADCP заключалась в фильтрации некачественных данных, предвычисления приливов и исключения данных, полученных во время выполнения океанографических станций. Основным критерием был процент качества данных (percent good, PG4). Были отбракованы данные, PG4 которых был менее 50 %. Дополнительно из обработки и последующего анализа были

исключены верхние 70 м, где по различным причинам получены некачественные данные, и придонный слой в соответствии с протоколами обработки.

Впервые океанографические исследования в Центральной котловине пролива Брансфилд выполнены в июне, в зимний период. Предыдущие работы проводились либо в летний сезон (январь–февраль), либо в осенний (март–апрель). Также, несмотря на то, что разрез был выполнен только в глубоководной его части без прибрежных станций, расположенных на шельфе и склоне у Южных Шетландских островов (1) и Антарктического полуострова (7–11), в структуре вод зафиксированы основные водные массы, наблюдававшиеся в предыдущих океанографических исследованиях на разрезе. Это дает нам возможность продолжить изучение межгодовой изменчивости термохалинных характеристик водных масс, начатое в рамках РАЭ в 2016 году, и оценить сезонные изменения, происходящие в структуре вод в зимний период. Также важным аспектом проведенных измерений в рамках 69-й РАЭ является их комплексность.

При выполнении океанографических станций в проливе Брансфилд зафиксированы следующие водные массы: транзитная вода моря Беллинсгаузена (ТВБ) — теплые и относительно пресные воды из моря Беллинсгаузена, распространяющиеся в стержне течения пролива Брансфилд вдоль побережья Южных Шетландских островов на северо-восток; транзитная вода моря Уэдделла (ТВУ) — холодные и относительно соленые воды из моря Уэдделла, переносимые Антарктическим прибрежным течением (АПТ) на шельфе и склоне Антарктического полуострова на юго-запад; модифицированная циркумполярная глубинная вода (МЦГВ) — теплые и соленые воды, которые поступают в пролив Брансфилд из южной струи Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) через пролив Бойда и, возможно, другие проходы; глубинная вода пролива Брансфилд (ГВБ) — воды, занимающие придонный слой Центральной котловины. По современным представлениям, ГВБ является результатом смешения трех водных масс в различной пропорции: циркумполярной глубинной воды из АЦТ и вод, поступающих из моря Уэдделла (антарктических шельфовых вод низкой солености и антарктических шельфовых вод высокой солености). Таким образом, основные водные массы, формирующие структуру вод в проливе, являются модификацией вод из моря Беллинсгаузена, моря Уэдделла или Антарктического циркумполярного течения либо смесью этих вод.

Распределение гидрохимических параметров в проливе Брансфилд имеет высокую пространственную неоднородность и отражает взаимодействие водных масс, динамику вод и процессы, связанные с потреблением биогенных элементов фитопланктонным сообществом. Также привлечение гидрохимических показателей позволяет более точно идентифицировать поступающие в пролив Брансфилд водные массы, образованные на шельфе моря Уэдделла, и воды, распространяющиеся из АЦТ и моря Беллинсгаузена.

В поверхностном слое в северной части разреза на станциях 2, 3 зафиксирована теплая и относительно пресная ТВБ, поступающая с юго-запада из моря Беллинсгаузена (рис. 3) в стержне течения пролива Брансфилд (ТБ). На станции 2 слой ТВБ наблюдался до глубины 290 м с $\theta = -0,61 \dots -0,25$ °C, $S = 34,28\text{--}34,34$ епс. На станции 3 слой этой водной массы сократился до 250 м. В слое ТВБ на этой станции наблюдалось влияние АПВ, которое выражено в понижении потенциаль-

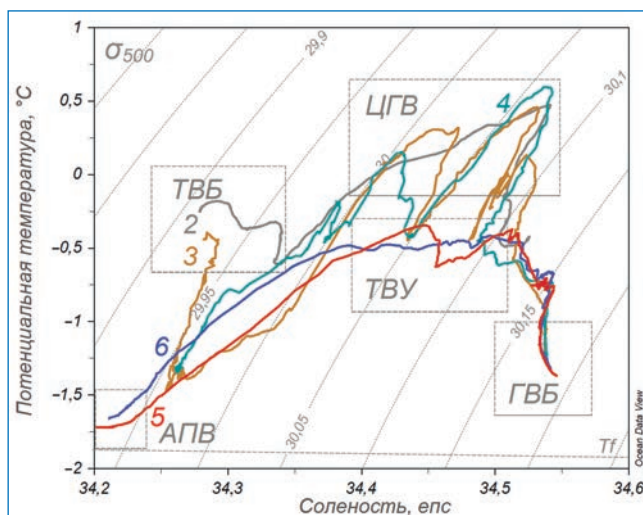
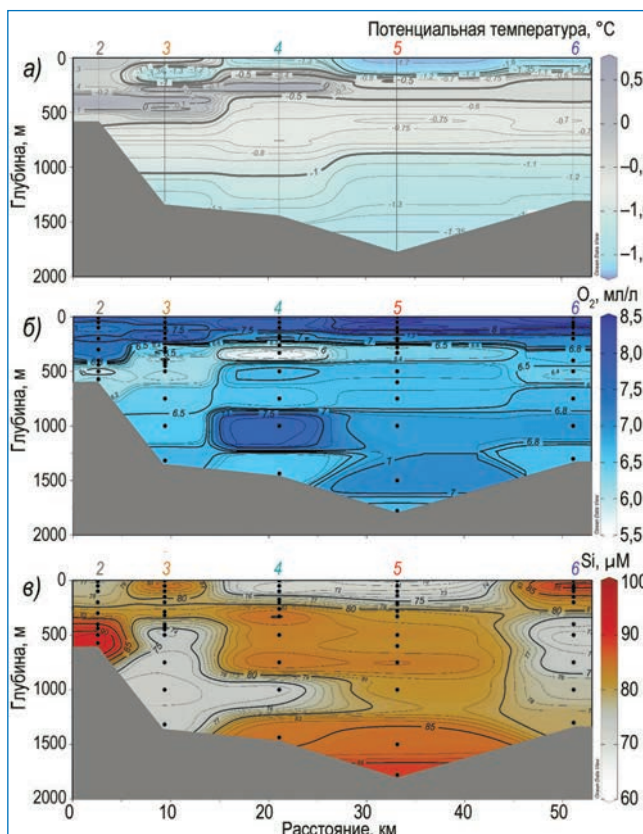


Рис. 3. *TS*-диаграмма океанографических станций на разрезе с обозначенными водными массами

ной температуры в слое ТВБ в подповерхностном слое до $-1,46$ °C и понижении солёности до 34,26 епс (рис. 3). Под слоем ТВБ зафиксирован слой ЦГВ. На станциях 5 и 6 в поверхностном слое наблюдался слой пресной и холодной АПВ. На станции 5 слой АПВ составил 156 м с $\theta_{\min} = -1,72$ °C, $S_{\min} = 34,21$ епс. На рис. 3 представлена *TS*-диаграмма океанографических станций на разрезе с обозначенными водными массами.

Важной отличительной особенностью наблюдаемой структуры вод по сравнению с предыдущими годами является наличие крупного залива модифицированных циркумполярных глубинных вод вдоль северного склона

Рис. 4. Распределение потенциальной температуры (а), концентрации растворенного кислорода (б) и силикатов (в) на регулярном разрезе в проливе Брансфилд



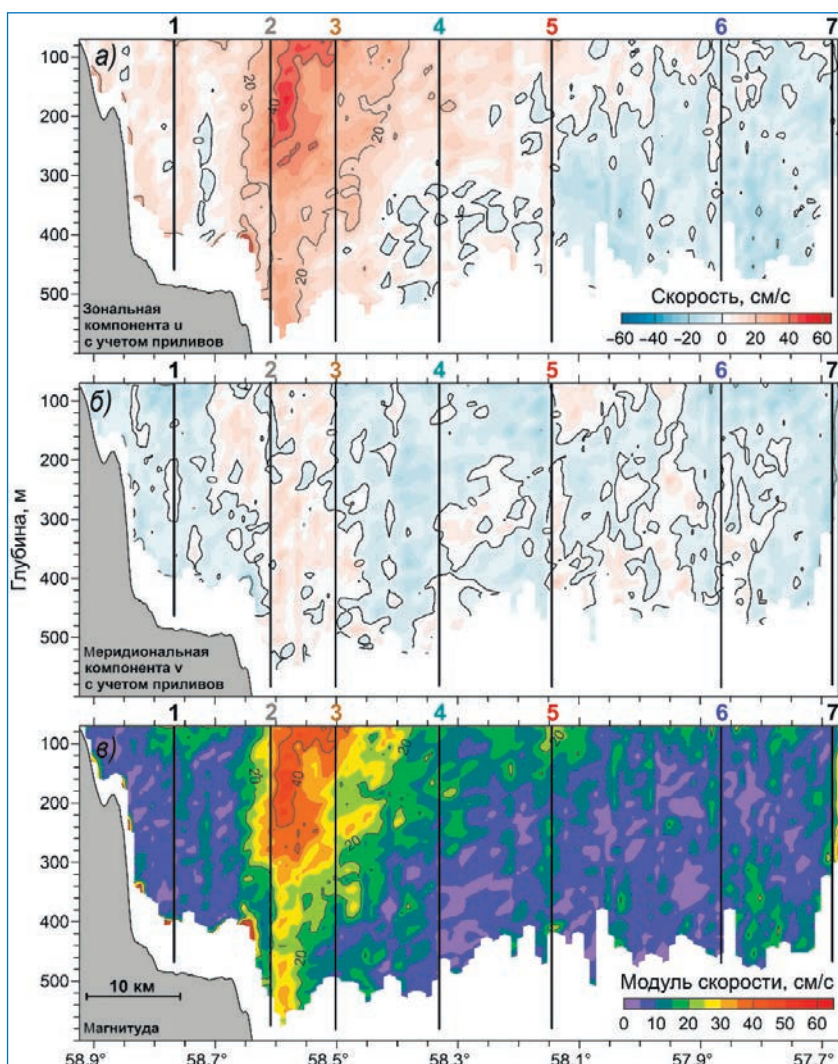
пролива и в центральной его части глубже 200 м. Данный заток идентифицируется по абсолютному максимуму температуры в холодный период, относительному максимуму солёности, абсолютному минимуму концентрации растворенного кислорода и относительному максимуму силикатов (рис. 3, 4). Циркумпольная глубинная вода зафиксирована на станциях 2, 3, 4, то есть в северной части разреза. На станциях 5, 6 ЦГВ не зафиксирована. Интересно, что ядро ЦГВ с максимальной потенциальной температурой 0,59 °С и солёностью 34,54 епс наблюдалось на станции 4 на глубине 260 м, а не на станциях, ближайших к стержню ТБ. В целом такое далекое распространение ЦГВ в глубоководную часть разреза может быть связано не с течением, а с переносом этих океанических вод в центральную часть котловины вихрями. Возможно, по этой же причине минимум концентрации растворенного кислорода 5,66 мл/л на станции 4 наблюдался не в ядре ЦГВ, а глубже, на глубине 330 м. Одинаково повышенная концентрация силикатов 85,6 мк наблюдалась как на горизонте 260 м с относительными максимумами температуры и солёности, так и на глубине 330 м, где эти максимумы уже не выражены. На рис. 4 представлено распределение потенциальной температуры, концентрации растворенного кислорода и силикатов на регулярном разрезе в проливе Бранс-

филд. Цветными цифрами обозначены номера станций, соответствующие номерам станций на рис. 1, 3.

В придонном слое на глубоководных станциях 4–6 зафиксирована максимальная температура и минимальная солёность ГВБ для периода наблюдений с 2016 года. Минимальная температура ГВБ в придонном слое на глубоководной станции 5 в этом году повысилась до -1,37 °С, солёность составила 34,55 епс. Также зафиксировано значительное уменьшение мощности слоя этих вод. Нужно отметить, что ГВБ в этом году характеризуются повышенной концентрацией силикатов (88,9 мк) и пониженной концентрацией растворенного кислорода (6,70 мл/л). Таким образом, наличие крупного затока модифицированной циркумпольной глубинной воды вдоль северного склона пролива и в центральной его части глубже 200 м, наблюдаемое повышение температуры, снижение солёности, повышенная концентрация силикатов и уменьшение концентрации растворенного кислорода в слое ГВБ могут рассматриваться как усиление влияния вод АЦТ в проливе, которое сопровождается увеличением доли ЦГВ в формировании ГВБ.

К сожалению, по метеоусловиям и из-за неблагоприятной ледовой обстановки выполнить работы на станциях 7–11, где проходит стержень АПТ, несущего ТВУ, не удалось. Поэтому не были получены значения

Рис. 5. Вертикальное распределение скорости и направления течений на регулярном разрезе в проливе Брансфилд: восточной компоненты u с коррекцией на прилив (а), северной компоненты v с коррекцией на прилив (б), модуля скорости течений без коррекции на прилив (в). Топография дна взята из базы GEBCO 2022

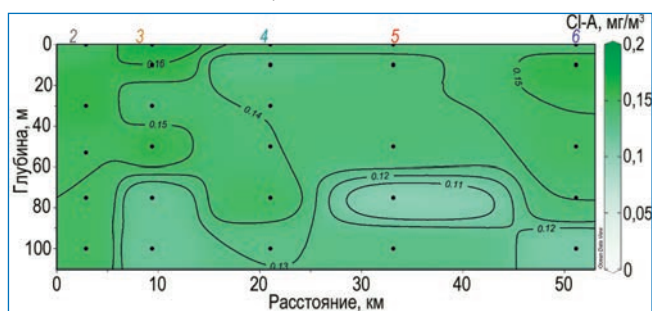


термохалинных и гидрохимических характеристик в ядре ТВУ, анализ которых позволил бы оценить влияние этой водной массы на ГВБ. В рамках выполненных станций в центральной части разреза (станции 5, 6) зафиксированы только трансформированные ТВУ с минимальной потенциальной температурой $-0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 представлено вертикальное распределение скорости и направления течений, полученное при поперечном пересечении пролива Брансфилд от о. Кинг Джордж (рис. 1). Данный разрез выполнен во время движения судна от российской антарктической станции Беллинсгаузен до станции 7 и по количеству качественных данных является наиболее полным из трех проходов. По распределению восточной и северной компоненты скорости в северной части разреза в районе станций 2–4 выделено ТБ, несущее с юго-западной части залива вдоль склона ТВБ в поверхностном слое и МЦГВ на глубинах более 200 м. Скорости течения превышают 30 см/с в слое толщиной 300 м. Наибольший вклад вносит восточная компонента скорости (более 50 см/с). Значения скорости северной компоненты при этом не превышают 15 см/с. Максимальные значения скорости течения составляют более 50 см/с, что в целом соответствует измерениям скорости течения пролива Брансфилд в летний период Южного полушария.

При отборе проб ихтиопланктонной сетью визуально был отмечен достаточно большой размер зоопланктона (в большей степени криля), который является прямым потребителем фитопланктонного сообщества и оказывает влияние на значения биомассы микроводорослей и хлорофилла «а». Также большую роль играет интенсивное перемешивание водных масс, вследствие чего хлорофилл распределяется по вертикали практически равномерно. Пространственное распределение хл-А в слое 0–100 м достаточно однородно, значения варьируются от 0,10 до 0,17 мг/м³ (рис. 6). На глубине 100 м значения незначительно падают до 0,11–0,13 мг/м³, что связано с ограниченным поступлением света на нижнюю границу фотической зоны. На станции 4 при зондировании 100-метрового слоя термоклин не наблюдался, поэтому в слое 0–100 м значения хл-А практически не изменяются (0,14 мг/м³), за исключением глубины 80 м, где концентрация опускается до 0,10 мг/м³. Во время работы наблюдалось сильное ветровое волнение (скорость ветра 9–13 м/с), которое способствовало интенсивному перемешиванию водной толщи. Низкое содержание хл-А на разрезе обусловлено отбором проб в зимний период (июнь), который характеризуется меньшей солнечной активностью, что непосредственно влияет на процессы вегетации микроводорослей. Биомасса также демонстрирует низкие значения и немногочисленную плотность фитопланктона. На рис. 6 представлено распределение концентрации хл-А в проливе Брансфилд на станциях 2–6 в слое 0–100 м.

Рис. 6. Распределение концентрации хлорофилла «а» в проливе Брансфилд на станциях 2–6 в слое 0–100 м



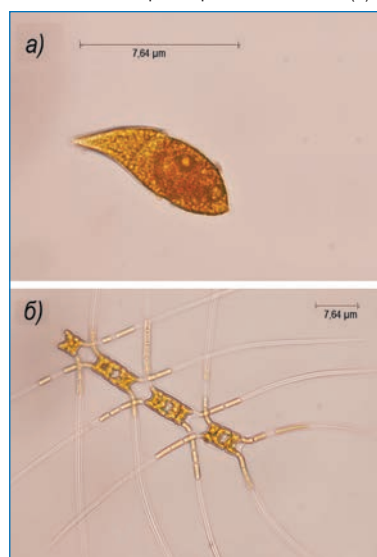
Видовое разнообразие микроводорослей в районе исследования в зимний период в июне 2024 года было представлено 2 систематическими отделами Dinophyta — 4, Bacillariophyta — 8. Основу видового разнообразия фитопланктона составляли диатомовые водоросли (64 %) и динофитовые (36 %). Среди динофлагеллят наиболее распространены одноклеточные виды родов *Gyrodinium* (рис. 7а), *Gymnodinium* и единичные клетки *Protoperedinium*, *Prorocentrum*, а среди диатомей — *Thalassiosira sp*, *Navicula sp*, *Fragilariopsis kerguelensis*, *Corethron pennatum*, *Proboscia inermis*, *Dactyliosolen antarcticus*, а также единичные клетки *Chaetoceros sp* (рис. 7б), *Nitzschia sp* и *Thalassiothrix antarctica*, *Lauderia annulate*, *Gomphonema sp*. На рис. 7 представлено фото микроводорослей с увеличением в 40 раз, OLYMPUS BX60.

Наибольшая численность, биомасса и видовое разнообразие фитопланктона отмечаются на станции 2 в поверхностном слое, что может быть связано с распространением теплых и относительно пресных транзитных вод моря Беллинсгаузена.

В целом пролив Брансфилд считается высокопродуктивным районом Южного океана для всех трофических уровней — от первичной продукции до скоплений зоопланктона, особенно криля, птиц и млекопитающих. Важную роль в обеспечении переноса и удержания биоты в проливе играет течение пролива Брансфилд, которое направлено на северо-восток и распространяется вдоль южного континентального склона Южных Шетландских островов. Поэтому включение исследования течения пролива Брансфилд в систему измерений, проводимых в рамках сезонных операций РАЭ, является одной из важных задач планируемых комплексных исследований в проливе.

Впервые в рамках сезонных операций РАЭ выполнено комплексное исследование на регулярном разрезе в проливе Брансфилд. Также нужно отметить, что разрез в рамках РАЭ был впервые выполнен в начале зимнего периода. Проведение исследования даже в сокращенном формате позволило определить термохалинную, гидрохимическую и динамическую структуру вод в глубоководной части разреза, продолжить изучение межгодовой изменчивости структуры вод в целом и в частности термохалинных характеристик глубинной воды пролива Брансфилд, определить распределение хлорофилла «а»

Рис. 7. Динофитовая водоросль рода *Gyrodinium* (а), диатомовая водоросль рода *Chaetoceros* (б)



в верхнем 100-метровом слое и исследовать видовой состав фито- и зоопланктонных сообществ в поверхностных водах.

Натурные данные были получены в рамках программы океанографических исследований Южного океана по Проекту 5.2 «Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктики и Южного океана» плана НИТР/ОПР Росгидромета (2020–2024 годы). Комплекс научно-исследовательских работ проводился в рамках 69-й сезонной РАЭ на борту НЭС «Академик Трёшников» при технической поддержке судовых специалистов.

Выражаем благодарность экипажу НЭС «Академик Трёшников» во главе с капитаном судна А.Г. Евгеновым,

заместителю начальника сезонной экспедиции А.Н. Николаеву и помощнику начальника сезонной экспедиции А.А. Платонову, содействовавшим выполнению работ по научным программам; научно-технической службе судна во главе с Г.А. Константиновым и полярникам, принимавшим участие в работах по научным программам в рамках 69-й РАЭ. Также авторы выражают благодарность С.В. Кашину и Д.И. Фрею за экспертную помощь в сборе натуральных данных в рамках 69-й РАЭ и ценные комментарии к статье.

*А.А. Федотова (ИО РАН), Я.В. Швед (ААНИИ),
Д.А. Смирнова (ИО РАН), А.А. Петрова (ААНИИ),
А.В. Весман (ААНИИ)*

СОВРЕМЕННЫЙ РОСТ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЕ ЯВЛЯЕТСЯ БЕСПРЕЦЕДЕНТНЫМ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 2000 ЛЕТ

В 2023 году закончились работы по гранту Российского научного фонда «Климатическая изменчивость на Восточно-Антарктическом плато за последние 2000 лет» (проект № 21-17-00246), выполнявшиеся в ААНИИ под руководством ведущего научного сотрудника отдела географии полярных стран А.А. Екайкина. Одним из основных результатов этого проекта стала реконструкция скорости снегонакопления в районе станции Восток за последние 2200 лет.

Баланс массы Антарктиды — одна из наиболее актуальных научных проблем современной гляциологии и климатологии в свете продолжающегося повышения глобальной температуры. Влияние потепления на баланс массы Антарктического ледяного щита довольно противоречиво: с одной стороны, оно сопровождается расширением зоны таяния на краю ледника, деградацией ледяных шельфов, ускорением динамики льда и, как следствие, ускорением абляции. С другой стороны, как климатические модели, так и экспериментальные данные говорят о том, что с ростом температуры должно расти количество осадков в зоне аккумуляции Антарктиды. Инструментальные данные о скорости снегонакопления доступны всего лишь в двух пунктах Центральной Антарктиды — в районе станций Восток и Амундсен-Скотт, и в обоих этих районах действительно наблюдается рост этого параметра на протяжении двух последних десятилетий. В настоящее время первый фактор (рост абляции) перевешивает, и Антарктида активно теряет массу, давая заметный вклад в повышение уровня моря.



Рис. 1. Фирновый керн, извлеченный из скважины VK23, январь 2019 года.
Фото А.Н. Верес

Целью нашего проекта было изучение климата в районе станции Восток на протяжении двух последних тысячелетий по данным исследования неглубоких (до 70 м) фирновых кернов (рис. 1). Измерение электропроводности и концентрации сульфатов в кернах позволило определить слои, в которых содержатся продукты известных вулканических извержений, и, таким образом, надежно датировать снежно-фирновую толщу. Тщательное измерение плотности фирна дало возможность рассчитать среднюю скорость снегонакопления между двумя соседними «вулканическими» слоями. Наконец, измерение изотопного состава фирна (рис. 2) (концентрации дейтерия и кислорода 18) позволило установить изменение температуры воздуха в прошлом. Результаты этих исследований показаны на рис. 3.

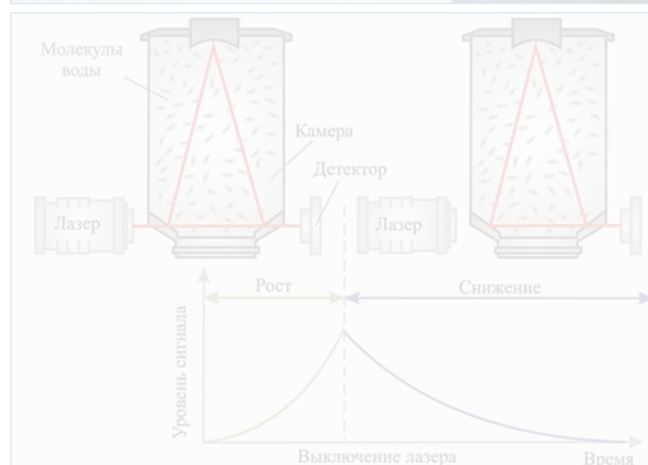


Рис. 2. Лазерный анализатор Picarro L2140-i (а) и принцип его действия (б)