

ТЕЧЕНИЯ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА И ДРЕЙФ БОЛЬШОГО АЙСБЕРГА А68А

© 2021 г. Е. Г. Морозов^{1, *}, В. А. Кречик¹, Д. И. Фрей¹, В. В. Замшин²

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

²Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*e-mail: egmorozov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

После доработки 08.03.2021 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

Рассмотрен дрейф большого (длина 160 км, площадь 5800 км²) айсберга А68А в западной части моря Уэдделла. Анализ проведен на основе спутниковых изображений и натурных измерений в районе айсберга. Айсберг откололся от ледника Ларсена в июле 2017 г. и медленно дрейфовал на север. В феврале 2020 г. во время 79 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” вблизи айсберга были выполнены гидрофизические наблюдения. Наличие айсберга в западной части моря Уэдделла привело к смещению струй течений и фронтов к западу в пространстве между айсбергом и Антарктическим полуостровом.

Ключевые слова: большой айсберг А68А, спутниковые изображения, течения, фронты, Sentinel-1, море Уэдделла

DOI: 10.31857/S0030157421050099

ВВЕДЕНИЕ

Антарктические айсберги образуются по всему периметру антарктического континента в основном за счет сползания материкового льда (ледников) в океан. Обычно они откалываются от шельфового ледника летом Южного полушария в теплый сезон [29]. Большое количество айсбергов образуется и задерживается в море Уэдделла. Основными районами их образования в море Уэдделла являются шельфовые ледники Ларсена и Фильхнера. В целом, движение айсбергов в большей степени определяется течениями в верхнем 200-метровом слое океана, чем ветром [8]. Однако если айсберг находится в ледяном поле, то основное движение происходит вместе с этим полем, где ветровая составляющая имеет большее влияние [27]. Айсберги в море Уэдделла обычно следуют на север по циклонической траектории в западной части моря и концентрируются вдоль западного края круговорота Уэдделла в области, известной как “Аллея айсбергов” (Iceberg Alley [14, 31]). Затем они выносятся на север в море Скотия примерно по 50° з.д. После дрейфа на север приблизительно до 60° ю.ш. айсберги начинают двигаться на восток, попадая в Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ). На рис. 1 показаны треки айсбергов с 1999 по 2009 г. и районы их интенсивного образования. Аналогичный рисунок треков приведен в работах [31] и [7].

В настоящее время гигантские айсберги (длина более 18.5 км) систематически отслеживаются и классифицируются. Крупными центрами спутникового мониторинга являются Национальный ледовый центр США (US NIC), Европейское космическое агентство (ESA) и Университет Бригама Янга (Brigham Young University) [15]. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН также длительное время ведет наблюдения за айсбергами в Южном океане [1, 4, 24, 25]. Мониторинг айсбергов является важной задачей ввиду того, что их таяние оказывает сильное влияние на тепловой баланс и циркуляцию поверхностного слоя океана, а также на морские экосистемы [15]. Таяние айсбергов снижает температуру поверхности моря на большей части Южного океана [20]. Поток пресной воды от таяния айсбергов в Южный океан к югу от 63° ю.ш. в среднем составляет 0.05 Св (1 Св = 10⁶ м³/с) [29]. Более ранние оценки дают 0.007 Св [1]. Особенно хорошо поток пресной воды выражен в море Скотия и западной части моря Уэдделла (0.012 Св от общего 0.05 Св). В процессе таяния айсбергов в море Уэдделла первичная продуктивность вод в радиусе нескольких километров от них значительно увеличивается за счет поступления биогенных веществ и микроэлементов [30, 9].

Самым большим когда-либо зарегистрированным айсбергом в современную эпоху был айсберг

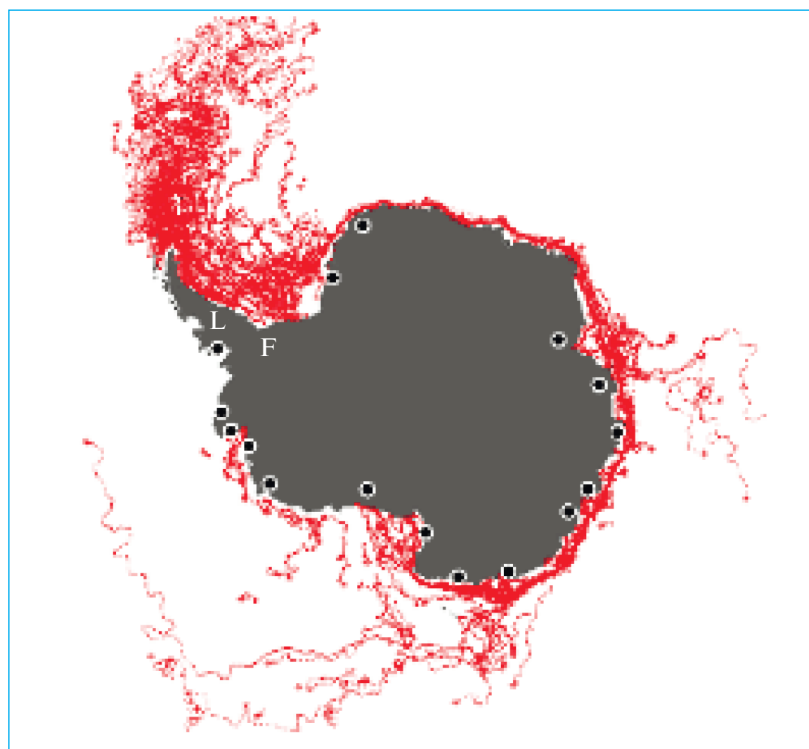


Рис. 1. Треки айсбергов в течение 11 лет (1999–2010 гг.) по данным The Antarctic Iceberg Tracking Database (<https://www.scp.byu.edu/data/iceberg/>). Кружками с черной точкой в центре в центре показаны районы интенсивного образования айсбергов. Районы в море Уэдделла показаны буквами L – ледник Ларсена и F – ледник Фильхнера

В15 площадью 11000 квадратных километров, который образовался на шельфовом леднике Росса в 2000 г. Его длина была 295 км, ширина 37 км. Вторым по размеру был айсберг А-38, который наблюдали в 1998 г. после отрыва от шельфового ледника Фильхнера-Ронне в Антарктиде. Длина айсберга была 144 км, ширина 48 км, а площадь поверхности 6900 км². Размер некоторых айсбергов фиксировался на момент отрыва. Некоторые из них выходили в океан, уже расколовшись на части.

В работе [23] показано, что самая большая часть айсберга В15 (В15А) ограничила поверхностную циркуляцию, охладила и опреснила поверхностный слой воды, чем замедлила таяние вблизи фронта шельфового ледника Росса на четыре года. Айсберг С19 нарушил процессы, происходящие в полынье моря Росса, на восстановление полыньи потребовалось от трех до четырех лет. Айсберг сместил область образования плотной воды в юго-западной части моря Росса.

Исследователи несколько лет наблюдают за айсбергом А68А. Это большая часть самого большого айсберга А68, обнаруженного в последние годы и шестого среди цельных айсбергов за всю историю спутниковых наблюдений с 1978 г. [22, 19]. А68 откололся от ледника Ларсена С в июле 2017 г. [15] и почти сразу разделился на две части –

А и В. В январе–феврале 2020 г. А68А находился вблизи северо-восточной оконечности Антарктического полуострова.

В данной статье представлены результаты натурных измерений в непосредственной близости от айсберга в феврале 2020 г. в районе о. Жуэнвилль и анализ его влияния на гидрофизические параметры окружающих вод.

ГИДРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МОРЯ УЭДДЕЛЛА

Море Уэдделла представляет собой окраинное море атлантического сектора Южного океана к востоку от Антарктического полуострова, а также является самым большим и глубоким морем Антарктики. Тяжелые ледовые условия надолго задержали исследования в этом море [2]. Первый, кто пересек 70° южной широты в 1823 г. в этом море, был английский мореплаватель и промышленник Джеймс Уэдделл. Все исследовательские экспедиции проникали в море только с восточной стороны, поскольку западная часть моря была всегда скована льдами.

Море Уэдделла (рис. 2) хорошо выделено топографически и имеет выраженные гидрографические особенности, а структура его поверхностной

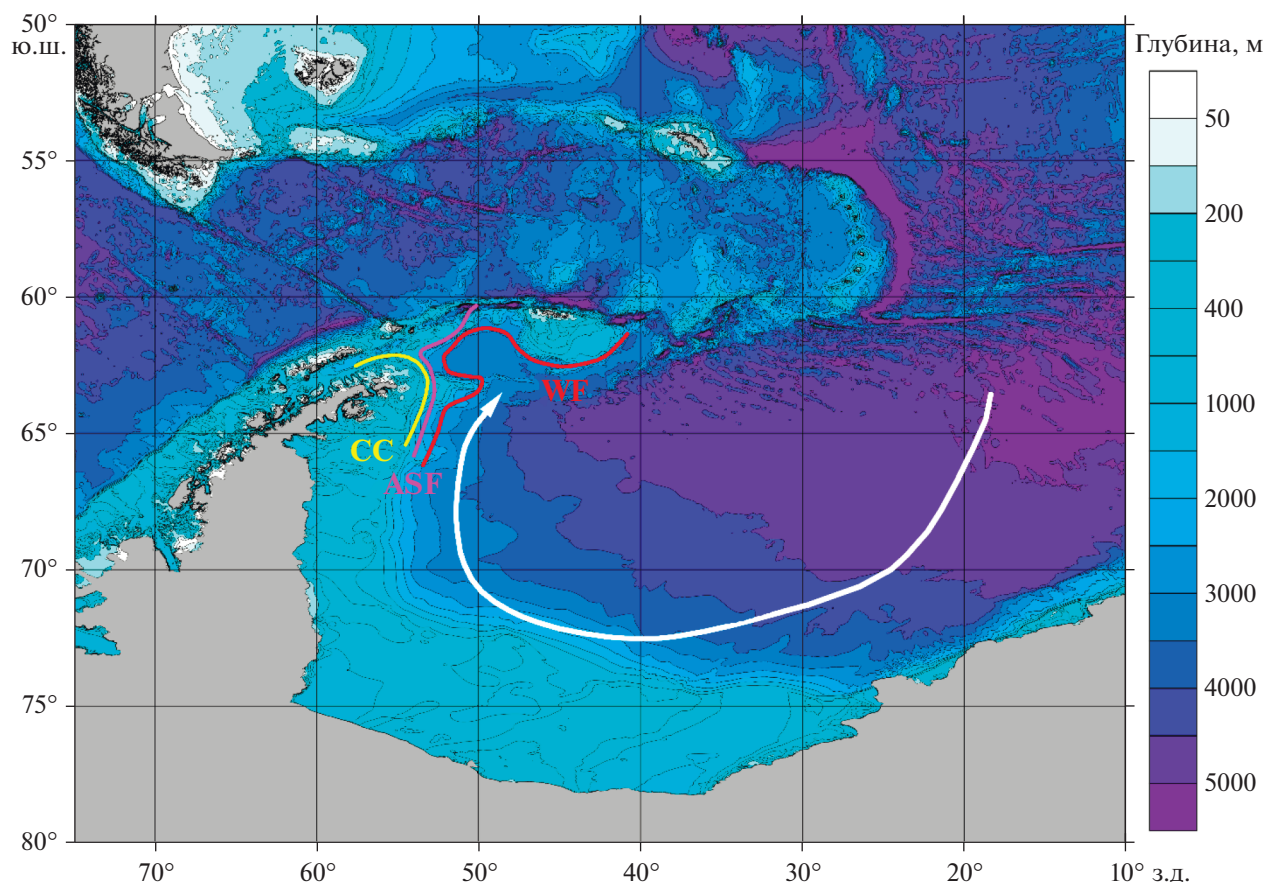


Рис. 2. Донная топография моря Уэдделла и прилегающих районов. Белой линией показана схема средней циркуляции. Фронты и течения в море: CC – Антарктическое прибрежное течение (Antarctic Coastal Current), ASF – Антарктический склоновый фронт (Antarctic Slope Front); WF – Фронт Уэдделла (Weddell Front) по [16, 34].

циркуляции – циклоническая. Циклонический круговорот Уэдделла (Weddell Gyre) определяется атмосферной циркуляцией над этим районом [21]. Антарктическое прибрежное течение (Antarctic Coastal Current, ACoC или CC) – это западная интенсификация циклонического круговорота. Течение направлено на север вдоль восточной части Антарктического полуострова (рис. 2). В этом районе выделяются Антарктическое склоновое течение, связанное с Антарктическим склоновым фронтом (ASF), а также Фронт Уэдделла (WF) (рис. 2), которые простираются над континентальным склоном на большие глубины [16].

Циклоническая циркуляция создает сильный баротропный северный поток в северо-западной части моря Уэдделла [16, 34], что приводит к выносу айсбергов на север [31]. В работе [5] показано, что перенос в районе Антарктического склонового фронта вдоль склона в западной части моря Уэдделла в слое от 450 до 2500 м достигает 5.9 Св. Циркуляция вод вокруг северной оконечности Антарктического полуострова (рис. 2) определяется потоком Антарктического прибрежного

течения, которое поворачивает на запад в обход о. Жуэнвиль.

Водные массы открытого океана в море Уэдделла взаимодействуют с семью широкими шельфовыми ледниками [13], что способствует образованию холодных вод, которые в дальнейшем опускаются в глубинные и придонные слои за счет большой плотности. При этом образуются такие водные массы, как Глубинная вода моря Уэдделла и Донная вода моря Уэдделла [13, 11]. В дальнейшем на основе Глубинной воды моря Уэдделла формируется Антарктическая донная вода (ААДВ), которая заполняет абиссальные котловины на большей части дна Атлантического океана, в то время как Донная вода моря Уэдделла так и остается в глубинах этого моря.

Первые данные о течениях в море были получены после дрейфа экспедиции Э. Шеклтона на судне “Эндьюранс” в 1915–1916 гг. Судно вышло из китовой бухты Грютвикен на о. Южная Георгия 5 декабря 1914 г. в направлении на бухту Фазеля (Vahsel) с координатами 77° ю.ш., 31° з.д. Однако 19 января судно вмерзло в лед в координатах

Таблица 1. Станции гидрофизических измерений 2, 15 и 16 февраля 2020 г.

Станция	Дата	Широта, ю.ш.	Долгота, з.д.	Глубина, м
6620	02.02.2020	62°32.374′	53°34.772′	994
6651	15.02.2020	62°32.310′	53°33.751′	1028
6652	15.02.2020	63°17.422′	53°36.034′	357
6653	16.02.2020	62°27.431′	52°14.820′	2923

76°34 ю.ш., 31°30 з.д. и начало дрейфовать на юго-запад, достигнув самой южной точки своего пути на широте 76°58′ ю.ш. 21 февраля, затем направление дрейфа сменилось на северное. В мае 1915 г. экспедиция была в точке 75°23′ ю.ш., 42°14′ з.д., а 27 октября в координатах 69°05′ ю.ш., 51°30′ з.д., где судно дало течь и люди перешли на лед. В марте 1916 г. ледовый лагерь продрейфовал в 60 миль от о. Паулет из группы островов Жуэнвиль. 8 апреля льдина раскололась, и экспедиция на шлюпках добралась до о. Элефант. Перемещения экспедиции Шеклтона показали траекторию, совпадающую со средней схемой циркуляции в пределах круговорота моря Уэдделла, а также согласующуюся с современной информацией о направлении дрейфа айсбергов в этом районе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые данные. Положение, форма и размеры айсберга А68А определялись по спутниковым снимкам, полученным радаром с синтезированной апертурой (Synthetic-aperture radar – SAR). Этот метод анализа спутниковых снимков является эффективным инструментом исследования положения айсбергов в Антарктике [28, 36]. Работа радара не зависит от облачности и освещенности, а к его неоспоримым достоинствам относится высокое пространственное разрешение и широкая полоса съемки.

В данной работе для отслеживания движения айсберга А68А были использованы снимки спутников серии Sentinel-1 (А и В), всего 32 снимка с НН-поляризацией в режиме широкой полосы охвата (Extra Wide swath), полученные в период с 1 декабря 2019 г. по 28 февраля 2020 г. (7, 11 и 14 за декабрь, январь и февраль соответственно). Применение автоматических методов идентификации границ айсберга сильно осложнялось наличием вокруг него большого количества льдин меньшего размера, а также припая, поэтому граница айсберга очерчивалась вручную на основе визуального анализа.

Для идентификации поверхностных течений в проливе Антарктик (Antarctic Sound) по дрейфу айсбергов уникальной формы [37] дополнительно использовались более 500 снимков спутниковой системы Sentinel-1.

Судовые измерения. Работы в районе расположения айсберга выполнялись в 79-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (АМК79) 2 февраля и 15–16 февраля 2020 г. [3]. На станциях проводились измерения вертикального распределения термохалинных параметров, а также скоростей и направления течений от поверхности до глубины около 5–7 м над дном. Всего вблизи айсберга было выполнено четыре станции зондирования зондом SBE-911 и двумя профилографами течений LADCP RDI Workhorse Monitor 300 kHz и Sentinel 300 kHz (табл. 1). На переходах между станциями проводились попутные измерения параметров течений в поверхностном слое моря с помощью встроенного судового профилографа SADCP (TRDI OS с частотой 76.8 кГц). Сбор данных осуществлялся с помощью программного обеспечения VmDas с двухминутным усреднением по времени. Влияние приливов (суточные и полусуточные компоненты) рассчитывалось с использованием глобальной модели приливов TPXO9.1 [10]. Данные ADCP были исправлены результатами модельных расчетов. В работе также была использована информация из общедоступной базы данных World Ocean Database (WOD18) [6] [https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Перемещения айсберга А68А с декабря 2019 по февраль 2020

Как уже отмечалось, образование айсбергов обычно происходит летом Южного полушария [29]. Однако айсберг А68 откололся зимой Южного полушария в период с 10 по 12 июля 2017 г. [22]. Это самый крупный айсберг, образовавшийся за последние 15 лет. Его длина на момент отделения от ледника Ларсена С составляла 160 км, а площадь была около 5800 км² [15]. Это ставит его на шестое место среди цельных айсбергов в океане, наблюдавшихся с 1978 г. [19]. Отрыв айсберга А68 уменьшил площадь ледника Ларсена С примерно на 12%. [22]. Вскоре после отделения от айсберга откололся небольшой кусок (около 90 км²), названный А68В. Площадь сформировавшегося А68А была равна 5786.3 км². Второе значительное сокращение площади (до 5620 км²) случилось в середине мая 2018 г. [15]. К 26 января 2019 г. айсберг сохранил 96% от первоначального размера [19].

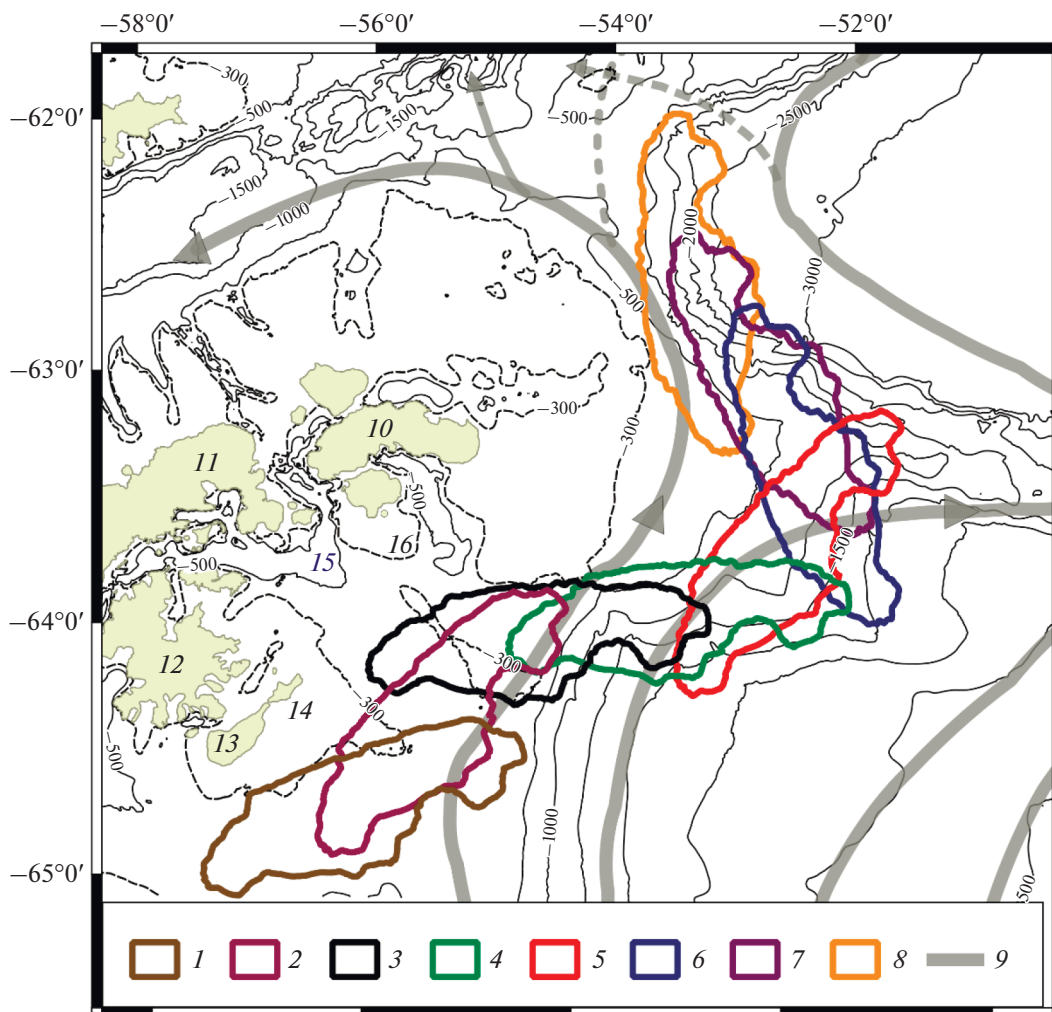


Рис. 3. Схема дрейфа айсберга А68А в декабре 2019—феврале 2020 гг. Условные обозначения: положение айсберга 1 — 1 декабря; 2 — 18 декабря; 3 — 30 декабря; 4 — 13 января; 5 — 23 января; 6 — 3 февраля; 7 — 16 февраля; 8 — 28 февраля; 9 — схема основных течений по [35]; 10 — о. Жуэнвиль; 11 — Антарктический полуостров; 12 — о. Джеймса Росса; 13 — о. Сноу-Хилл; 14 — о. Симор; 15 — залив Эребус и Террор; 16 — о. Паулет.

Преобладающими ветрами и течениями айсберг начал смещаться на север вдоль восточного побережья Антарктического полуострова, и в летний сезон Южного полушария 2019—2020 гг. его дрейф резко ускорился. В этом районе и в этот сезон дрейф льдины экспедиции Шеклтона в 1915—1916 гг. также ускорился. Заметим, что айсберг дрейфовал ближе к берегу, поскольку оторвался от ледника, а судно “Энджуранс” дрейфовало в мористой части после вмержания в лед. Движение судна было быстрее. К началу декабря 2019 г. А68А уже находился южнее архипелага Жуэнвиль в районе о. Джеймса Росса (рис. 3).

До середины декабря айсберг продвигался на северо-восток (азимут большой оси — около 65°), однако в период с 13 по 18 декабря течения вдавливают его в залив Эребус и Террор и скорость дрейфа заметно снижается. Медленное движение А68А сопровождается отделением льдин разного

размера. В это время при контакте с подводной частью о. Симор был оторван наиболее крупный кусок площадью около 28 км². К 30 декабря А68А под воздействием Антарктического прибрежного течения и течения Антарктического склонового фронта на юго-западную часть айсберга он совершает разворот по часовой стрелке и следует вдоль изобат в восточном направлении (рис. 3).

В первой половине января 2020 г., находясь южнее о. Жуэнвиль, айсберг продолжает продвигаться на восток. Отделение мелких льдин происходит в его северо-восточной части в районе изобаты 300 м. С 15 по 23 января, под влиянием течения Фронта Уэдделла, он совершает очередной разворот вдоль изобат против часовой стрелки. Направление дрейфа меняется на северное. В конце месяца его большая ось ориентирована близко к направлению север—юг (рис. 3). Движе-

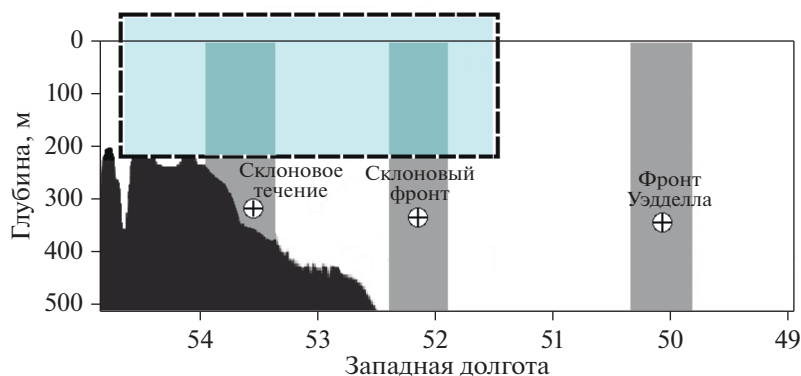


Рис. 4. Схема расположения струй течений на разрезе от о. Жуэнвилль на юго-восток и положение айсберга А68А (выделен пунктиром). Положение струй со скоростями (в чертеж ⊕) около 15 см/с показано серым цветом по данным LADCP (рис. 9 из работы [33]). Схематичное положение айсберга показано на 13 января 2020 г.

ние и разворот айсберга происходят вблизи изобаты 500 м.

В феврале А68А находится к востоку от о. Жуэнвилль и продолжает движение по изобате 500 м, направляясь на северо-северо-запад. 28 февраля северная оконечность айсберга находилась в координатах $61^{\circ}56.39'$ ю.ш., $53^{\circ}25.895'$ з.д.

В целом, дрейф айсберга в период исследования осуществлялся со средней скоростью 4.46 км/сут и в основном вдоль 500-метровой изобаты. В районах нахождения А68А вблизи изобаты 300 м наблюдалось отделение от него множества преимущественно небольших льдин. Самой крупной отделившейся частью была льдина площадью около 28 км^2 , отколовшаяся в период с 13 по 18 декабря. Средняя скорость дрейфа значительно превышала среднюю скорость в период с июля 2017 по август 2018 (7.2 км/месяц) [19].

В 2020 г. айсберг А68А постепенно терял массу и двигался в направлении на о. Южная Георгия, переносимый Антарктическим циркумполярным течением. Струи АЦТ, связанные с полярным фронтом, огибают о. Южная Георгия с двух сторон [32]. Спутниковые наблюдения за кусками А68А в январе 2021 г. показали, что они прошли южнее о. Южная Георгия.

2. Изменчивость течений и структуры вод под влиянием айсберга А68А

Известно, что западная часть круговорота Уэдделла к востоку от Антарктического полуострова представлена тремя струями, которые соответствуют фронтам (рис. 3): Антарктическое прибрежное течение, Антарктический склоновый фронт и Фронт Уэдделла. Схема струй течений к юго-востоку от северной точки Антарктического полуострова представлена на разрезе по данным работы [33] (рис. 4). Измерения проводились по программе ADELIE в феврале 2007 г. (158-й рейс НИС “James Clark Ross”). Положения станций

разреза и айсберга А68А на 13 января 2020 схематично показано на рис. 4. В этот день айсберг располагался почти вдоль широты 64° ю.ш. и перекрывал струи течений. Обратим внимание на размеры айсберга: он около 160 км в длину, т.е. примерно 3.3 градуса по долготе (рис. 4). Оценка его подводной осадки — около 200–250 м, поэтому он некоторое время мог быть частично заякорен на дне.

С начала исследуемого периода айсберг переносится струей Антарктического прибрежного течения и, прижимаясь к изобатам, препятствует ее проникновению в прибрежные районы Антарктического полуострова. Айсберг больше, чем о. Жуэнвилль, поэтому он изменяет структуру течений и вод в регионе. Совершив разворот и двигаясь на восток в течение января, А68А препятствует движению струй Антарктического прибрежного течения и течения Антарктического склонового фронта в обход шельфа о. Жуэнвилль (рис. 2) и, по всей видимости, перенаправляет их на восток, тем самым оказывая влияние и на течение Фронта Уэдделла. С разворотом айсберга в конце января конфигурация прибрежного и склонового течений начинает восстанавливаться. Течение Антарктического склонового фронта, поворачивая на север, наталкивается на айсберг и вынуждено изменить направление на северо-западное, двигаясь между о. Жуэнвилль и А68А, тем самым усиливая Антарктическое прибрежное течение.

Рассмотрим наши измерения около айсберга 2 и 15–16 февраля 2020 г. Они также показывают, что присутствие айсберга внесло изменения в структуру течений. Во время перехода НИС “Академик Мстислав Келдыш” в бассейн Пауэлла и обратно судно огибало айсберг и выполнило станции вблизи него (рис. 5).

Измерения течений погружным профилографом LADCP на станциях 15–16 февраля 2020 г. показали малые скорости течения (не более 10 см/с) с преобладающим направлением на восток. При

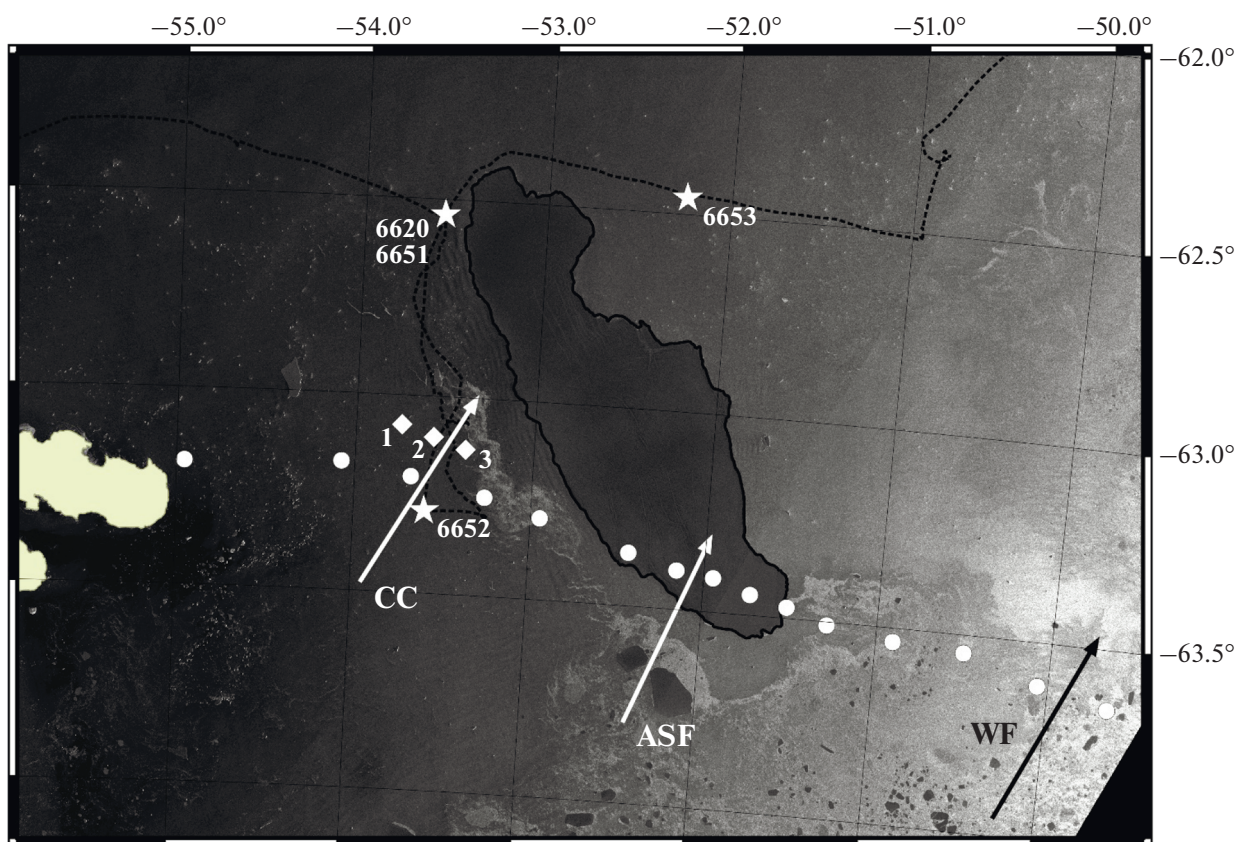


Рис. 5. Изображение айсберга со спутника Sentinel-1 в 07:50 UTC 16 февраля 2020 г. Маршрут судна вокруг айсберга и станции рейса АМК79. Станции 6651, 6652, 6653 – большие звезды (15–16 февраля 2020 г), станция 6620 выполнена в точке станции 6651 2 февраля. Три ромба показывают положение станций 1, 2, 3 из базы данных WOD18 2 марта 1991 г. Белые точки показывают станции разреза, а стрелки – струи течений CC, ASF, WF по измерениям 10–12 февраля 2007 г. [33]. Пунктирная линия – маршрут судна 15–16 февраля.

этом, сравнивая положения айсберга примерно на широте 63° ю.ш. и разрез из работы [33], который был направлен от северной точки о. Жуэнвиль на юго-восток между широтами 63° ю.ш. и 64° ю.ш., и принимая во внимание глубину океана на станциях, а также течения на рис. 4, можно полагать, что станции должны находиться в динамических зонах основных течений. В частности, северо-западная станция (6651, глубина 1027 м) должна находиться в струе течения Антарктического склонового фронта, северо-восточная станция (6653, глубина 2972 м) – на Фронте Уэдделла, а южная станция (6652) на глубине 360 м должна находиться в струе Антарктического прибрежного течения. Однако положение струй может быть сильно отклонено присутствием айсберга. Измерения, выполненные судовым профилографом течений SADCP, также показали несвойственную району исследования динамическую структуру.

2 февраля 2020 г. между айсбергом и о. Жуэнвиль наблюдалось сильное течение на северо-запад, вызванное, вероятно, усилением струи Антарктического прибрежного течения за счет тече-

ния Антарктического склонового фронта. Течение усилилось в узком пространстве между островом и айсбергом. Севернее А68А течение имеет юго-восточное направление и связано, вероятно, с южной струей АЦТ. Антарктическое прибрежное течение (CC) обгибает о. Жуэнвиль, а склоновое течение, связанное с Антарктическим склоновым фронтом, сталкивается с южной ветвью АЦТ северо-западнее айсберга. К северу и северо-северо-востоку от айсберга не прослеживается течение Фронта Уэдделла (рис. 6а). Предполагаем, что его струя расположена восточнее.

Измерения на станциях 15–16 февраля в непосредственной близости от айсберга также показывают наличие течения южной ветви АЦТ, которое при контакте с айсбергом расходится на две струи. Струя АЦТ, направленная на юг, взаимодействует с течением Антарктического склонового фронта, которое следует вдоль западной оконечности айсберга и отклоняет его на запад. Течение Фронта Уэдделла следует вдоль восточной оконечности айсберга, которая отличается сильной изрезанностью. При ее обтекании происходит возникновение вихрей, в которых частично

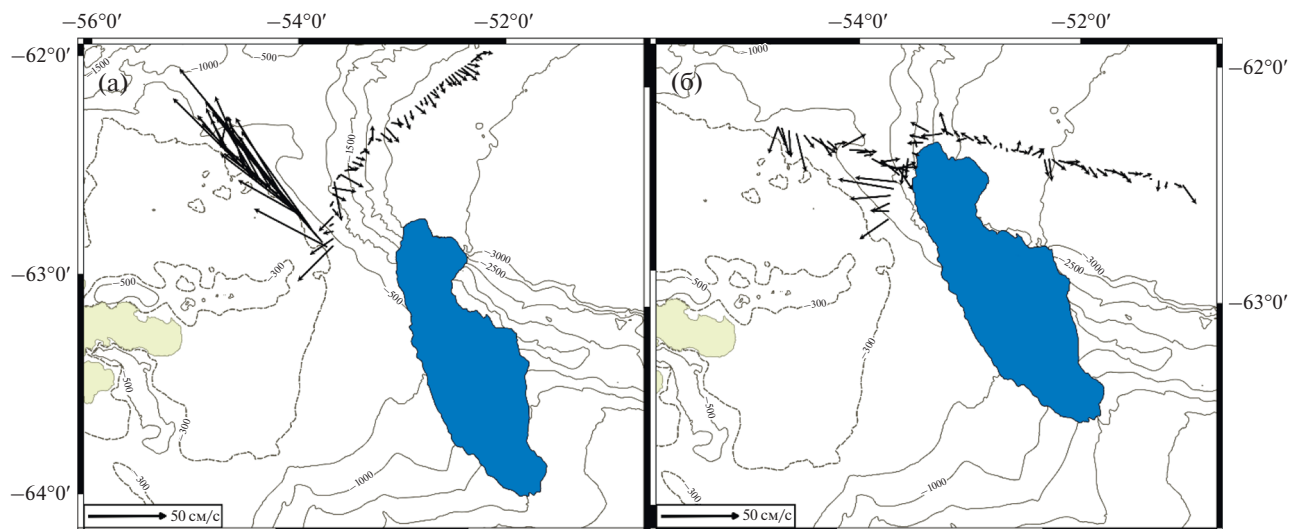


Рис. 6. Скорости и направления поверхностных течений в районе айсберга А68А (показан синим цветом) по данным судового профилографа течений: 2 февраля 2020 г. (а); 15–16 февраля 2020 г. (б). Показаны средние значения в слое 30–300 м.

рассеивается энергия течения. После отрыва от айсберга часть течения уходит в северо-западном направлении и далее, вероятно, следует вдоль изобат. Вторая часть течения огибает айсберг с севера, взаимодействует со струей течения южной ветви АЦТ и, по-видимому, также уходит на северо-запад (рис. 6б).

Присутствие гигантского айсберга отразилось также и на термохалинной структуре района. В частности, профили солености на станциях пока-

зывают опреснение верхнего слоя (рис. 7). Для сравнения приведен профиль из базы данных WOD18 (кривая *S*), выполненный в этом районе в отсутствие айсберга. Наибольшее влияние талой воды в присутствии айсберга наблюдается на глубинах до 20 м, однако и в более глубоких слоях заметны пониженные значения солености. Более сильное опреснение наблюдается к востоку от айсберга. Профиль из базы данных WOD18 показывает отсутствие опреснения, квазиоднородное распределение солености и более высокие ее значения (колебания в тысячных значениях около 34.43 psu).

В обычных условиях в прибрежной части к западу от Антарктического склонового фронта вертикальная структура температуры не имеет подповерхностного минимума. Весь слой воды холодный и сильно перемешан. К востоку от фронта летом имеется подповерхностный холодный слой на глубине около 100 м. Он образуется за счет зимней конвекции и летнего прогрева верхнего слоя Зимней воды. На даты наших измерений 15–16 февраля 2020 г. поверхность уже начала выхолаживаться. В более глубоких слоях моря находится теплая вода моря Уэдделла, которая поступает из Антарктического циркумполярного течения в восточную часть моря. Наши станции к западу от айсберга находились на долготе около $53^{\circ}35'$ з.д. и имели подповерхностный минимум, нехарактерный для прибрежных вод. На станциях разреза 1991 г. и на станциях из работы [33] на этой долготе уже находится прибрежная холодная перемешанная вода (зеленая и фиолетовая кривые 2 и 1 на рис. 8). Однако за счет присутствия айсберга эта вода сместилась ближе к острову. Заметим,

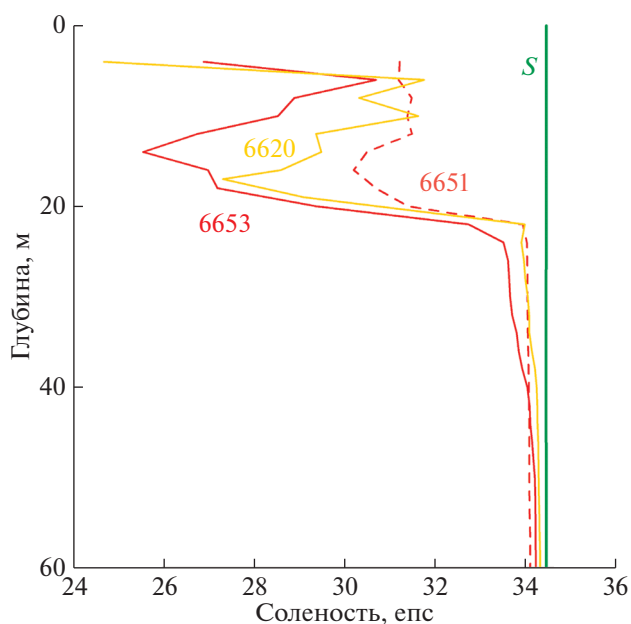


Рис. 7. Профили солености на станциях вблизи А68А (см. рис. 5, табл. 1) соответственно номерам. Кривая *S* (зеленая) – профиль из базы данных WOD18, измеренный 5.11.1992 г. в координатах $63^{\circ}06'$ ю.ш., $53^{\circ}35'$ з.д.

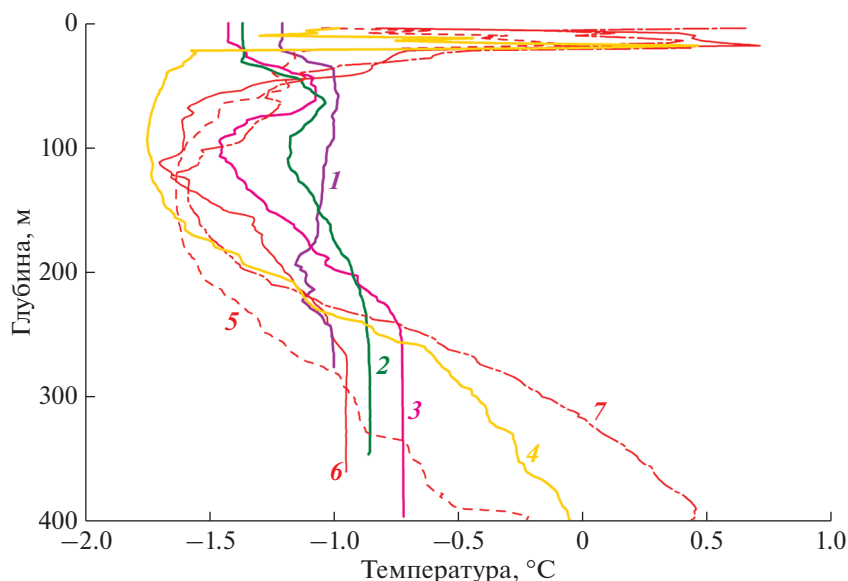


Рис. 8. Вертикальное распределение температуры на станциях (см. рис. 5, табл. 1).

Кривые 1–3 – профили на разрезе 1–2 марта 1991 г. из базы данных WOD18 соответственно номерам на рис. 5. Кривые 4, 5, 6 и 7 – рейсовые станции АМК79: 6620, 6651, 6652 и 6653 соответственно.

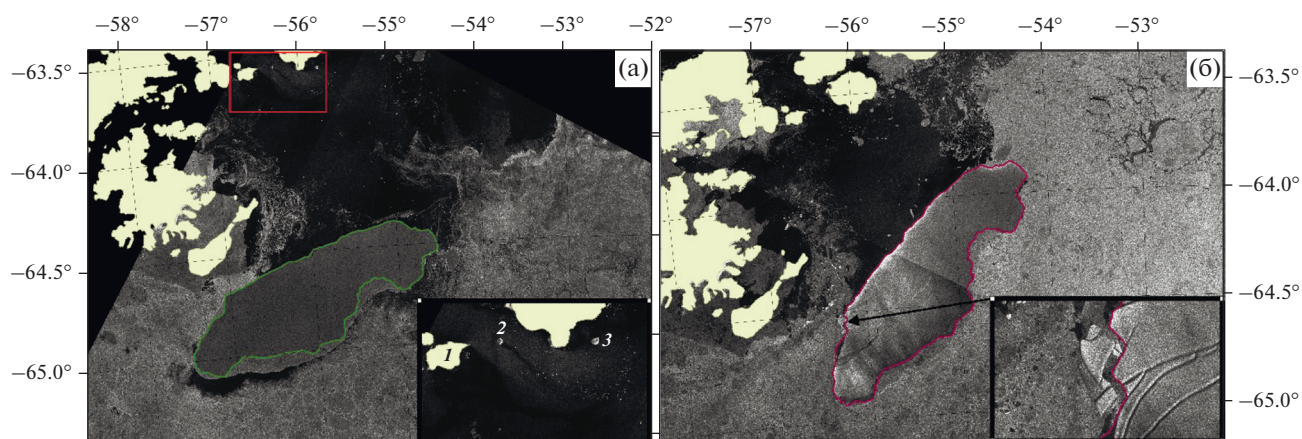


Рис. 9. Положение айсберга А68А в декабре 2019 г. (а) – положение айсберга 1 декабря 2019 г., на врезке показаны следы обтекания островов Андерссона (1), Розамеля (2), и Паулет (3). Место врезки на карте показано прямоугольником. (б) – положение айсберга 18 декабря 2019 г., на врезке показан крупный отделившийся кусок, расположение врезки на карте указано стрелкой.

что на станциях в марте 1991 г. воды на поверхности уже полностью выхолделись.

Присутствие очень большого айсберга привело к изменению течений и структуры вод в районе Антарктического склонового фронта. Две струи течений сдвинулись на запад в узком пространстве между берегом и айсбергом. Воды с подповерхностным минимумом температуры, характерные для моря Уэдделла к востоку от Антарктического склонового фронта, который расположен примерно над изоботой 100 м, сместились примерно на 15–20 км на запад. В этом районе к западу от ASF обычно находятся воды с меньшей изменчивостью температуры по вертикали.

3. Гипотеза об ограничении потока из моря Уэдделла в пролив Антарктик и влияние на его циркуляцию

Система циркуляции в проливе Антарктик малоизучена, но многие авторы считают этот пролив местом дополнительного поступления воды из моря Уэдделла в пролив Брансфилда с преобладанием течения с юго-востока на северо-запад [18, 26]. В первой половине декабря 2019 г. А68А располагался юго-восточнее о. Джеймса Росса и в значительной степени препятствовал поступлению воды в район пролива. Об ограничении водообмена свидетельствует спутниковый снимок от 1 декабря, на котором видны различия между

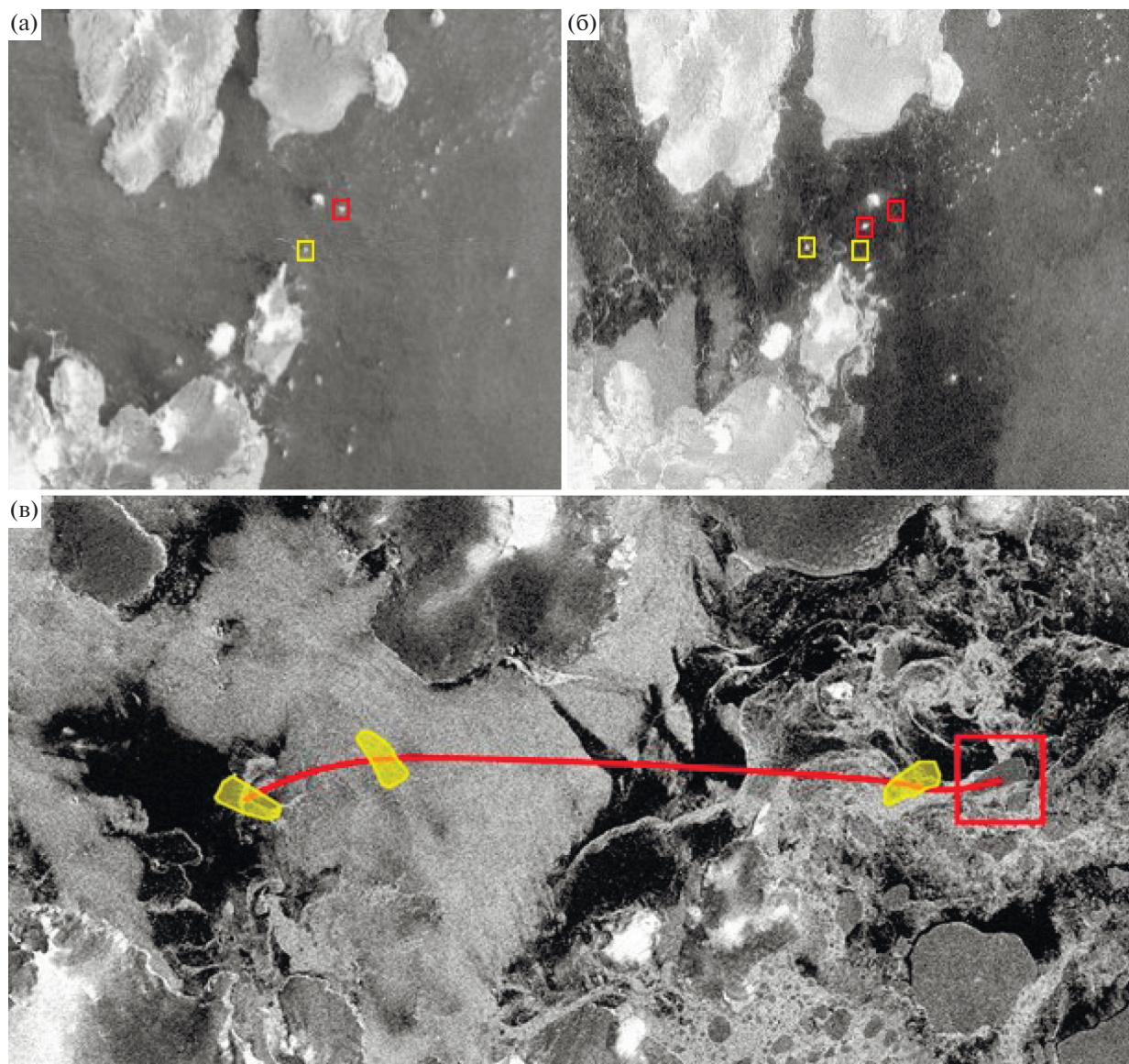


Рис. 10. Дрейф айсбергов в проливе Антарктик: пара движущихся айсбергов 11.12.2019 (выделены рамками) (а); пара движущихся айсбергов (рамками выделены айсберги 13.12.2019 и их положения 11.12.2019) (б); дрейф айсберга через пролив с северо-запада на юго-восток с 1 по 5 февраля 2018 г. (в). Движущийся айсберг выделен рамкой; линией и силуэтами отмечены траектория и предыдущие положения айсберга на 1, 2 и 4 февраля.

водой вблизи пролива, где нет большого количества мелкого льда, а крупные льдины отсутствуют, и водой моря Уэдделла (рис. 9а). Расположение и ориентация ледяных полей показывает, что поступление воды из мористой части происходит через узкий коридор между айсбергом и о. Сноу-Хилл, а также в обход айсберга. На снимке хорошо видны следы от обтекания о. Розамеля и о. Андерссона, показывающие течение из пролива Брансфилда (рис. 9а).

В течение первых двух недель декабря айсберг медленно смещается на северо-восток. В период с 13 по 18 декабря в районе островов Сноу-Хилл и Симор происходит закоривание А68А, сопро-

вождающееся небольшим разворотом и отделением его довольно крупной части (около 28 км²). Из-за смещения и разворота айсберга проход для воды здесь становится шире. Это вызывает увеличение объема поступающей воды из моря Уэдделла (рис. 9б). Дальнейший дрейф айсберга на северо-восток и его разворот по часовой стрелке на угол около 45° делает пролив более доступным для Антарктического прибрежного течения. А смещение на восточном направлении в течение января полностью открывает залив Эребус и Террор.

Во второй половине декабря в акватории за айсбергом увеличивается количество крупных льдин. Непосредственно в проливе также появля-

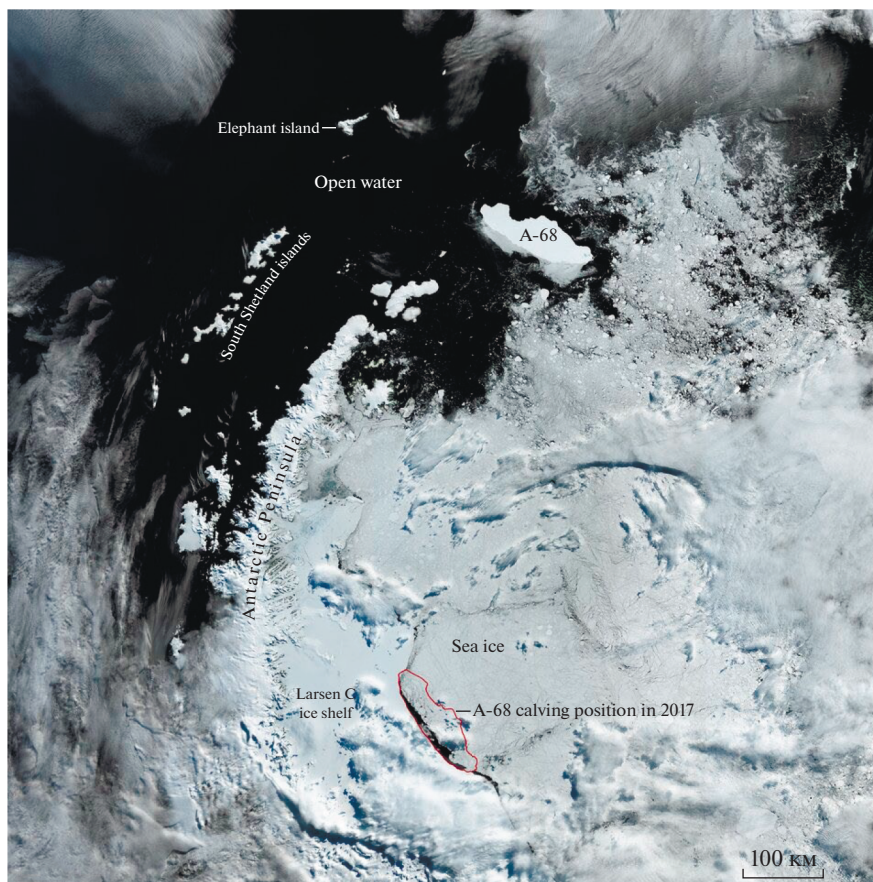


Рис. 11. Изображение айсберга А68А со спутника Copernicus Sentinel-3 9 февраля 2020 г. (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Giant_A68_iceberg_three_years_on).

ется лед. 11 и 13 декабря выявлена информативная пара айсбергов, дрейфующих от восточного входа к западному (см. рис.10а, 10б).

Для понимания системы течений, характерной для пролива независимо от влияния айсберга, был выполнен анализ спутниковых снимков района за весь 2018 г. Результаты показали, что значительную часть года пролив и северный проход в него были свободны от айсбергов. Вблизи южного прохода, напротив, регулярно образовывались ледовые пробки. В отдельные периоды (например, с 8 по 15 мая, с 19 по 20 июля, с 3 по 7 августа 2018 г.) в пролив Антарктик проникают льды, скапливающиеся в заливе Эребус и Террор. Однако, несмотря на скопившуюся массу льда и определенную тенденцию к движению на запад, значительные его массы в пролив так и не попадают. Необходимо отметить, что имеет место и обратное движение. В частности, с 1 по 5 февраля 2018 г. был зафиксирован айсберг, совершивший дрейф через пролив с северо-запада на юго-восток (рис. 10в). Неравномерность движения айсберга, а также его вращение может свидетельствовать о сложной реверсивной картине течений в проливе.

По измерениям в рейсе АМК79 течения и перенос в проливе Антарктик были направлены преимущественно на юго-восток [17], что указывает на приток воды из пролива Брансфилда. В это время в проливе Антарктик было мало айсбергов и льда, что для пролива нехарактерно. Причиной, по-видимому, стал айсберг, который не только физически ограничил прямое поступление воды в пролив, но и повлиял на течения в проливе Антарктик, нарушая естественную циркуляцию основных течений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен дрейф большого (длина 160 км, площадь 5800 км²) айсберга А68А в западной части моря Уэдделла в декабре–феврале 2020 г. Положения айсберга в момент отрыва в 2017 г. (схематично) и во время 79 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” показаны на рис. 11. Средняя скорость дрейфа за три месяца составила 4.46 ± 1.50 км/сут. Анализ проведен на основе спутниковых изображений айсберга и измерений в море. Айсберг откололся от ледника Ларсена в июле 2017 г. и медленно дрейфовал на север.

В феврале 2020 г. айсберг вышел из сплоченных льдов и сдрейфовал в район исследований рейса. Наличие айсберга с большой массой и размерами привело к изменению течений и структуры вод в северо-западной части моря Уэдделла в районе Антарктического слонового фронта. Две струи течений сместились на запад. Воды с подповерхностным минимумом температуры (ниже -1.5°C), характерные для моря Уэдделла к востоку от Антарктического склонового фронта, оказались смещены на 15–20 км на запад. В этом районе к западу от ASF обычно находятся воды с меньшей изменчивостью температуры по вертикали.

Соленость подповерхностного слоя в районе айсберга уменьшилась на несколько единиц PSU за счет таяния айсберга. Выдвинута гипотеза о том, что айсберг, закорившись на дне в восточной части пролива Антарктик, перекрыл течение в пролив. Поэтому во время наших работ в проливе в феврале 2020 г. пролив был свободен ото льда и мелких айсбергов.

19 мая 2021 г. появилась информация, что новый большой айсберг А-76 откололся от шельфового ледника Фильхнера — Ронне в море Уэдделла. Длина айсберга 170 км, ширина 25 км. Айсберг был идентифицирован Британской антарктической службой.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0128-2019-008) и НИИ Аэрокосмос 0588-2019-0030. Анализ натуральных наблюдений в проливе Антарктик поддержан грантом МК-1492.2021.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зотиков И.А., Иванов Ю.А., Барбаиш П.В. Сток материкового льда Антарктиды и формирование донных антарктических вод // *Океанология*. 1974. Т. 14. № 4. С. 607–613.
2. Клепиков В.В. Гидрология моря Уэдделла // *Труды Сов. Антарктической Экспедиции*. 1963. Т. 17. С. 45–93.
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. Романов Ю.А. Краткая история наблюдений над антарктическими айсбергами, основные цели исследования айсбергов и центра сбора данных наблюдений над айсбергами // *Прикосновение к океану*. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. С. 129–156.
5. Azaneu M., Heywood K.J., Queste B.Y., Thompson A.F. Variability of the Antarctic slope current system in the Northwestern Weddell sea // *J. of Physical Oceanography*. 2017. V. 47. № 12. P. 2977–2997.
6. Boyer T.P., Antonov J.I., Baranova O.K. et al. World Ocean Database 2018. A.V. Mishonov, Technical Ed., NOAA Atlas NESDIS 87. 2018. 207 p.
7. Budge J.S., Long D.G. A Comprehensive Database for Antarctic Iceberg, Tracking Using Scatterometer Data // *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. V. 11. № 2. P. 434–442.
8. Collares L.L., Mata M.M., Kerr R, et al. Iceberg drift and ocean circulation in the northwestern Weddell Sea, Antarctica // *Deep Sea Res., Part II*. 2018. V. 149. P. 10–24.
9. Duprat L.P.A.M., Bigg G.R., Wilton D.J. Enhanced Southern Ocean marine productivity due to fertilization by giant icebergs // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. № 3. P. 219–221.
10. Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. of Atmospheric and Oceanic technology*. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
11. Fahrbach E., Hoppema M., Rohardt G. et al. Decadal-scale variations of water mass properties in the deep Weddell Sea // *Ocean Dynamics*. 2004. V. 54. № 1. P. 77–91.
12. Fahrbach E., Peterson R. G., Rohardt G. et al. Suppression of bottom water formation in the southeastern Weddell Sea // *Deep Sea Res., Part I*. 1994. V. 41. № 2. P. 389–411.
13. Fahrbach E., Rohardt G., Krause G. The Antarctic coastal current in the southeastern Weddell Sea // *Polar Biol.* 1992. V. 12. № 2. P. 171–182.
14. Gladstone R.M., Bigg G.R., Nicholls K.W. Iceberg trajectory modeling and meltwater injection in the Southern Ocean // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2001. V. 106. № C9. P. 19903–19915.
15. Han H., Lee S., Kim J-I. et al. Changes in a giant iceberg created from the collapse of the Larsen C ice shelf, Antarctic Peninsula, derived from Sentinel-1 and CryoSat-2 data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. № 4. P. 404.
16. Heywood K.J., Naveira Garabato A.C., Stevens D.P., Muench R.D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2004. V. 109. № C6. C06021.
17. Krek A.V., Krek E.V., Krechik V.A. Circulation and mixing zone in the Antarctic Sound in February 2020 // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology*. Dordrecht: Springer, 2021. В печати.
18. López O., Garcia M.A., Gomis D. et al. Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica) // *Deep Sea Res., Part I*. 1999. V. 46. № 10. P. 1755–1778.
19. Lopez-Lopez L., Parmiggiani F., Moctezuma-Flores M., Guerrieri L. SAR image observations of the A68 iceberg drift // *The Cryosphere Discussions*. 2020. P. 1–16.
20. Merino N., Le Sommer J., Durand G. et al. Antarctic icebergs melt over the Southern Ocean: Climatology and impact on sea ice // *Ocean Modelling*. 2016. V. 104. P. 99–110.
21. Orsi A.H., Nowlin W.D., Whitworth T. III. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // *Deep-Sea Res.* 1993. V. 40. P. 169–203.
22. Parmiggiani F., Moctezuma-Flores M., Guerrieri L., Battagliere M.L. SAR analysis of the Larsen-C A68 iceberg displacements // *International J. of Remote Sensing*. 2018. V. 39. № 18. P. 5850–5858.

23. *Robinson N.J., Williams M.J.M.* Iceberg-induced changes to polynya operation and regional oceanography in the southern Ross Sea, Antarctica, from *in situ* observations // *Antarctic Science*. 2012. V. 24. № 5. P. 514–526.
24. *Romanov Y.A., Romanova N.A., Romanov P.* Distribution of icebergs in the Atlantic and Indian ocean sectors of the Antarctic region and its possible links with ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 2. L02506. <https://doi.org/10.1029/2007GL031685>
25. *Romanov Y.A., Romanova N.A., Romanov P.* Shape and size of Antarctic icebergs derived from ship observation data // *Antarctic Science*. 2012. V. 24. № 1. P. 77–87.
26. *Sangrà P., Gordo C., Hernandez-Arencibia M., et al.* The Bransfield current system // *Deep Sea Res., Part I*. 2011. V. 58. № 4. P. 390–402.
27. *Schodlok M.P., Hellmer H.H., Rohardt G., Fahrbach E.* Weddell Sea iceberg drift: Five years of observations // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2006. V. 111. № C6. P. 4807–4825.
28. *Silva T.A.M., Bigg G.R.* Computer-based identification and tracking of Antarctic icebergs in SAR images // *Remote sensing of environment*. 2005. V. 94. № 3. P. 287–297.
29. *Silva T.A.M., Bigg G.R., Nicholls K.W.* Contribution of giant icebergs to the Southern Ocean freshwater flux // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2006. V. 111. № C3. C03004.
30. *Smith K.L., Robison B.H., Helly J.J. et al.* Free-drifting icebergs: hot spots of chemical and biological enrichment in the Weddell Sea // *Science*. 2007. V. 317. № 5837. P. 478–482.
31. *Stuart K.M., Long D.G.* Tracking large tabular icebergs using the SeaWinds Ku-band microwave scatterometer // *Deep Sea Res., Part II*. 2011. V. 58. № 11–12. P. 1285–1300.
32. *Tarakanov R.Yu.* MultiJet structure of the Antarctic Circumpolar Current // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Oceanography and Ecology*. Dordrecht: Springer, 2021. В печати.
33. *Thompson A.F., Heywood K.J.* Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // *Deep Sea Res., Part I*. 2008. V. 55. № 10. P. 1229–1251.
34. *Thompson A.F., Heywood K.J., Thorpe S.E. et al.* Surface circulation at the tip of the Antarctic Peninsula from drifters // *J. of Physical Oceanography*. 2009. V. 39. № 1. P. 3–26.
35. *Von Gyldenfeldt A.B., Fahrbach E., García M.A. Schröder M.* Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula // *Deep Sea Res., Part II*. 2002. V. 49. № 21. P. 4743–4766.
36. *Wesche C., Dierking W.* Near-coastal circum-Antarctic iceberg size distributions determined from Synthetic Aperture Radar images // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 156. P. 561–569.
37. *Williams R.N., Rees W.G., Young N.W.* A technique for the identification and analysis of icebergs in synthetic aperture radar images of Antarctica // *International J. of Remote Sensing*. 1999. V. 20. № 15–16. P. 3183–3199.

Currents in the Western Part of the Weddell Sea and Drift of the Large Iceberg A68A

E. G. Morozov^{a, #}, V. A. Krechik^a, D. I. Frey^a, and V.V. Zamshin^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

^b*Scientific Research Institute of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow, Russia*

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

The drift of a large (length 160 km, area 5800 km²) A68A iceberg in the western part of the Weddell Sea is considered. The analysis was carried out on the basis of satellite images and field measurements in the area of the iceberg. The iceberg broke away from the Larsen Glacier in July 2017 and slowly drifted northward. In February 2020, during cruise 79th of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh*, hydrophysical observations were carried out near the iceberg. The presence of an iceberg in the western part of the Weddell Sea leads to the displacement of currents and fronts to the west in the space between the iceberg and the Antarctic Peninsula.

Keywords: large iceberg A68A, satellite images, currents, fronts, Sentinel-1, Weddell Sea