

УДК 551.324;551.583

СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ПРОГРЕСС (ЗАЛИВ ПРЮДС), 2022–2025 ГГ.

© 2026 г. А. В. Терехов*, У. В. Прохорова, С. Д. Григорьева, М. Р. Кузнецова

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

**e-mail: avterekhov@aari.ru*

Поступила 28.10.2025 г.

После доработки 25.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

В прибрежной зоне Восточной Антарктиды, в районе станции Прогресс, проведены измерения снегонакопления и скоростей течения ледникового щита, дополненные георадарными исследованиями. Среднее изменение высоты снежно-фирновой поверхности в 2022/23–2024/25 гг. составило +71, +55 и +23 см за балансовый год. В последнее десятилетие межгодовая изменчивость снегонакопления в некоторой степени объясняется суммами положительных градусо-дней, пространственное распределение связано с высотой и экспозицией. Показано, что первые 30 км трассы санно-гусеничных походов от станции Прогресс в сторону станции Восток относятся к разным ледосборам: измеренные скорости движения льда составили 6.8–49.7 м/год в дальней части профиля, лежащей в верховьях выводного ледника Поларорбокен, и всего 0.8–2.2 м/год в ближней части, расположенной в пределах невыводного участка щита. Сравнение с историческими данными показало ускорение течения ледника в среднем на 24% за последние 10–15 лет, что с учётом аналогичных тенденций соседних выводных ледников позволяет сделать заключение о значительном росте притока ледникового льда в залив Прюдс. В пределах участка работ выявлено несколько зон трещин, характеризующихся каплевидной в разрезе формой. Ширина трещин в приповерхностной части не превышает 0.4 м, однако на глубине 10 м составляет до 3.1 м. Корреляция направления трещин с направлением движения ледовых масс не выявлена.

Ключевые слова: аккумуляция, Антарктика, скорости ледников, баланс массы, снежный покров, изменение климата, ледниковые трещины, георадиолокация, холмы Ларсеманн

DOI: 10.7868/S2412376526020018

ВВЕДЕНИЕ

Антарктический ледниковый щит в настоящее время сокращается и, по прогнозам, будет продолжать терять массу из-за изменений климата, обеспечивая до четверти от общей величины повышения уровня Мирового океана в течение следующего столетия (IPCC, 2023). Это сопоставимо с вкладом прочих источников — таяния Гренландского ледникового щита и горных ледников, а также теплового расширения океана. Однако наибольшая неопределённость в прогнозах повышения уровня моря связана именно с ледниковым щитом Антарктиды.

Причём не только модельные оценки, но даже измерения фактического баланса массы в отдельных случаях не согласуются друг с другом, причём наибольшее расхождение наблюдается для областей Восточной Антарктиды (Otosaka et al., 2023). В связи с этим, непосредственные измерения баланса массы Антарктического ледникового щита, и в особенности восточной его части, представляют исключительный научный интерес. Данные наземного мониторинга могут служить как для верификации дистанционного зондирования, так и основой для калибровки и валидации математических моделей, включая палеореконструкции по ледяным кернам.

Помимо фундаментально-научной ценности, гляциологические исследования в Антарктике имеют и прикладное значение. В пределах антарктических ледников зачастую расположены важные объекты логистической инфраструктуры полярных станций – например, трассы внутриконтинентальных походов и взлётно-посадочные площадки. Функционирование этих объектов сопряжено с рисками, возникающими из-за ледниковых трещин и несущими угрозу полного или частичного проваливания транспортной техники, травмирования или гибели людей. Для обеспечения безопасности работ необходимо заблаговременное выявление трещин и количественная оценка их характеристик: формы, ширины в приповерхностной части, направления, мощности снежных мостов, что эффективно решается при помощи метода георадиолокации.

Один из районов Антарктиды, для которого эти вопросы крайне актуальны, – это территория на побережье залива Прюдс, и прилегающая к оазису холмов Ларсеманн. Здесь расположены три круглогодичные полярные станции – Прогресс (Россия), Чжуншань (Китай), Бхарати (Индия) и сезонные полевые базы. Наиболее значимые объекты инфраструктуры в данном районе – это пункт формирования внутриконтинентальных санно-гусеничных походов (СГП) к станциям Восток (Россия), Куньлунь, Тайшань (Китай) и их трасса на поверхности ледника; посадочная площадка “Зенит” для приёма дальнемагистральных самолётов на колёсном шасси

(Россия); снежный аэродром для приёма малых самолётов на лыжном шасси (Китай); трассы, соединяющие пункты разгрузки научно-экспедиционных судов.

Нагрузка на ледниковую инфраструктуру района значительно возросла в ходе работ, связанных со строительством нового зимовочного комплекса станции Восток с 2021 по 2024 гг. Холмы Ларсеманн служили промежуточным пунктом для доставки строительных грузов и топлива морским путём в Антарктиду и дальнейшей перевозки на станцию Восток. Для обеспечения безопасности транспортных операций в 2019 г. начаты комплексные инженерные изыскания, включавшие геофизические и гляциологические работы. Наиболее протяжённый и полный массив данных накоплен на полигоне, приуроченном к трассе санно-гусеничных походов. Полученные материалы позволили проанализировать особенности приповерхностного строения, распределения скоростей и направлений течения ледника, а также динамики высоты снега по данным полевых измерений 2022–2025 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования представляет собой окраинную часть ледникового щита Восточной Антарктиды: от побережья залива Прюдс, где расположена действующая российская полярная станция Прогресс (69°23' ю.ш., 76°23' в.д.), и примерно на 30 км вглубь материка, вдоль трас-

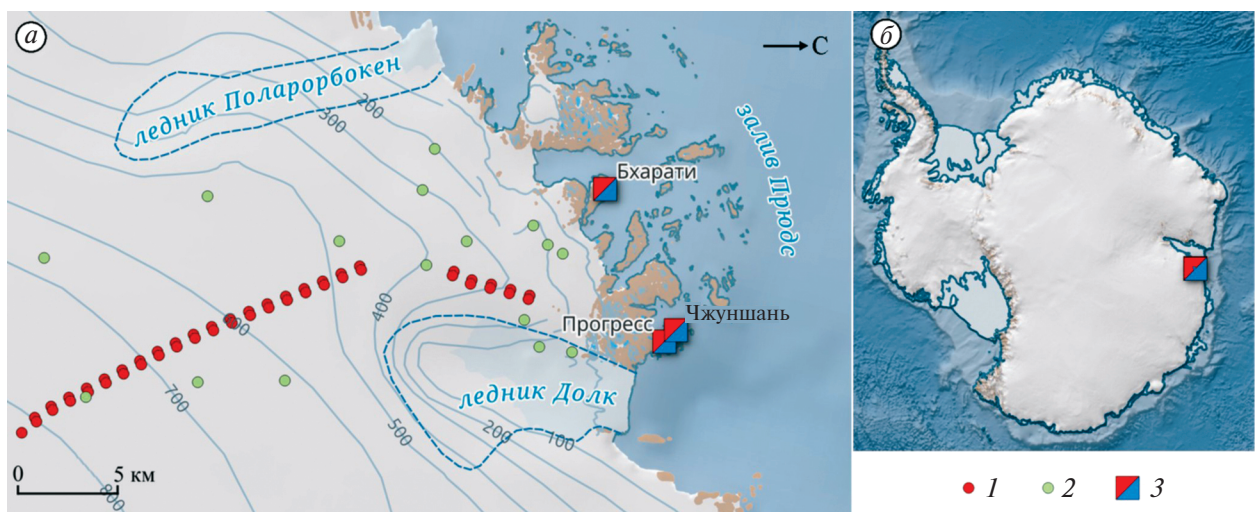


Рис. 1. Район исследования (а) и его положение на карте Антарктиды (б).

1 – абляционные рейки станции Прогресс, 2 – абляционные рейки станции Бхарати, 3 – круглогодичные полярные станции в районе работ

Fig. 1. Study area (a) and its location on the map of Antarctica (b).

1 – ablation stakes of Progress Station; 2 – ablation stakes of Bharati Station; 3 – year-round polar stations within the study area

сы санно-гусеничного похода в сторону станций Восток, Куньлунь, Тайшань. Рассматриваемая область ограничена выводными ледниками Долк (Dålk) на востоке и Поларорбокен (Polarårboken) на западе (рис. 1).

Климат в районе станции Прогресс определяется выраженным влиянием Южного океана и стоковых ветров с ледникового склона, что делает его типичным для прибрежных районов Восточной Антарктиды. Среднегодовая температура воздуха составляет $-9...-10$ °C, а в летние месяцы (декабрь–февраль) средние значения температуры около $0...-1$ °C. В отдельные дни фиксируются оттепели, когда среднесуточные температуры превышают $+4$ °C, в экстремальных случаях достигая $+10$ °C (Ding et al., 2022). Статистически значимые тренды в температуре воздуха за последние три десятилетия отсутствуют (Ding et al., 2022).

Ветровой режим района определяется кататических ветрами, дующими в основном с востока как в летний, так и в зимний сезоны (Shevnina et al., 2021). При этом, по данным измерений, наблюдается статистически значимое снижение средней скорости ветра – тренд составляет -0.4 м/с за десятилетие при среднем значении 6.9 м/с (Ding et al., 2022). Осадки представлены почти исключительно снегом; по измерениям метеостанций Прогресс и Чжуншань их годовое количество составляет $150-160$ мм водного эквивалента (в. э.) (Shevnina et al., 2021).

Радиационный режим в рассматриваемом районе подвержен значительным межгодовым колебаниям. По данным реанализа выделяются два периода: в $1990-2004$ гг. наблюдалось увеличение потока приходящей коротковолновой радиации; после 2004 г., наоборот, снижение, что объясняется изменениями облачности и содержания водяного пара (Zeng et al., 2021). Влажность воздуха в прибрежной зоне заметно выше, чем во внутренней Антарктиде, и имеет выраженную сезонность. В тёплые периоды фиксируются отдельные эпизоды повышения влажности, связанные с адвекцией океанического воздуха; статистически значимые тренды отсутствуют (Xie et al., 2014).

Геофизические работы. Съёмки методом георадиолокации выполнялись с целью картирования ледниковых трещин и установления их геометрических характеристик в приповерхностной части. Основной объём геофизических исследований выполнен в рамках сезонной 67-й РАЭ (2021/22 г.) и позволил картировать зоны трещин, развитые

в пределах трассы СГП и вблизи неё; в ходе зимовочного периода 68-й РАЭ проведена повторная детальная съёмка. В последующие годы работы проводились в пределах уже известных зон трещин и были направлены на оценку толщины снежных мостов и степени опасности трещин. Также в статье приводятся материалы георадарных работ, выполненных в 2019/20 г. в пределах предыдущего проложения трассы СГП.

Георадарное профилирование проводилось в пределах полосы шириной 250 м вдоль трассы СГП. Сеть съёмки включала продольный профиль, проложение которого совпадало с трассой, и ортогональные поперечные профили через $50-100$ м. Комплект аппаратуры включал георадар Zond 12e с антенным блоком 500 МГц. Планово-высотная привязка георадарных данных обеспечивалась совместным использованием штатного одометра и DGPS-приёмника EFT M2, работающего в режиме RTK. Перемещение по профилям выполнялось либо пешим порядком, либо буксировкой георадара на жёсткой сцепке тягачом Kässbohrer PistenBully Polar 300 со скоростью $4-6$ км/ч.

Камеральная обработка данных георадиолокации включала в себя: первичную обработку – фильтрацию, регулировку профиля усиления, подбор скоростных параметров среды и пересчёт скорости электромагнитных волн в глубины; выделение трещин на основе следующих факторов: ослабление амплитуды отражённой электро-магнитной волны, прерывание внутри-ледниковых границ, наличие дифрагированных волн, сформированных стенками трещины; нанесение на карту точечных координат трещин, полученных на основе георадиолокации, и последующую пространственную интерполяцию между профилями; анализ полученных материалов для оценки безопасности трассы.

Гляциологические работы. Абляционные рейки были установлены парами (49 штук, последняя рейка непарная) вдоль профиля, начинающегося от посадочной площадки “Зенит” и идущего вдоль первых 30 км трассы СГП к станции Восток, образуя две группы; расстояние между парами рек в каждой группе составляет 1 км, за исключением пар $109-110$ и $111-112$, расстояние между которыми составляет 5 км (см. рис. 1). Две группы рек далее для краткости называются “верхней” и “нижней” в соответствии со своим высотным положением. Измерения на профиле проводились ежегодно с $4.02.2022$ по $19.02.2025$, в начале и в конце тёплого периода года.

Определение плановых координат абляционных рек выполнялось высокоточным GNSS-приёмником. Направление и скорость движения ледника определялись по изменению положения рек на моменты крайних измерений – первого и последнего в ряде наблюдений, скорости были пересчитаны в м/год.

В качестве альтернативного источника данных о направлении и скорости течения льда в исследуемом районе применён датасет MEaSUREs версии 2. Датасет имеет континентальный охват, пространственное разрешение 450 м/пикс, и был получен на основе спутниковых радиолокационных данных. Основная часть задействованных радарных съёмок проведена в периоды 2007–2009 и 2013–2016 гг. Конкретной временной привязки фрагментов датасета не предоставляется (Rignot et al., 2017).

Снегонакопление. Изменение высоты снежно-фирновой поверхности измеряли по абляционным рейкам. Расстояние от верха рейки до поверхности измерялось рулеткой; по разности отметок на разные даты рассчитывалась величина снегонакопления/абляции.

Метеорологические данные. В качестве источника метеорологических данных применялся архив наблюдений станции Прогресс (gp5.gu..., 2025), включающий срочные измерения температуры воздуха на высоте 2 м, а также скоро-

сти и направления ветра на высоте 10 м. По исходным временным рядам рассчитаны годовые суммы положительных градусов (positive degree-days), а также определены преобладающие направления ветра.

Данные о рельефе. Для анализа связей между снегонакоплением и морфометрическими величинами применён фрагмент цифровой модели рельефа (ЦМР) REMA с пространственным разрешением 10 м (Howat et al., 2022). ЦМР REMA представляет собой бесшовную мозаику, полученную путём фотограмметрической обработки стереопар разновременной спутниковой съёмки высокого разрешения в видимом диапазоне. Средствами открытой геоинформационной системы “SAGA GIS” по ЦМР REMA произведён расчёт уклонов и экспозиции рельефа, а также годового количества приходящей солнечной радиации при ясном небе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Движение льда. Наблюдаемые скорости течения льда невысоки (метры и первые десятки метров в год) и характерны для окраинной зоны антарктического щита, за исключением крупнейших выводных ледников (Arthern et al., 2015). Верхняя группа рек (рис. 2) почти целиком относится к бассейну ледника Поларорбокен и смещается в его направлении, а измеренные скорости тем выше, чем ближе профиль подхо-

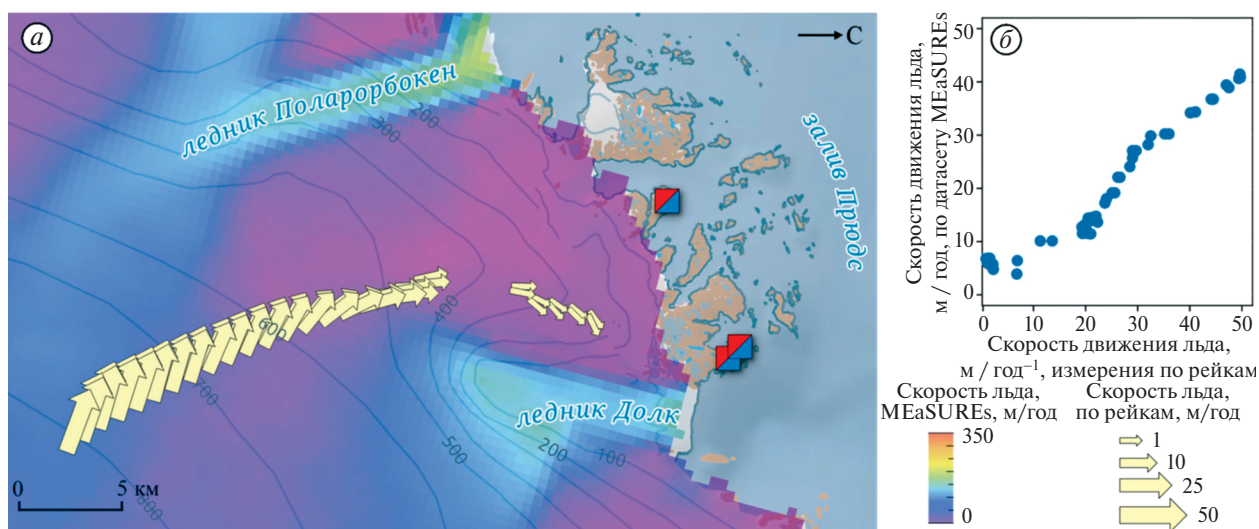


Рис. 2. Скорости движения льда в районе станции Прогресс: пространственное распределение (а), сопоставление скоростей, полученных двумя методами (б).

1 – скорости и направления перемещения абляционных рек; 2 – круглогодичные полярные станции

Fig. 2. Ice-flow rates in the area of Progress Station: spatial distribution (a), comparison of velocities derived by two methods (b). 1 – velocities and directions of ablation stake displacement; 2 – year-round polar stations

дит к оси выводного ледника (измеренный максимум — около 50 м в год). Рейки нижней по абсолютной высоте группы, принадлежащие менее подвижному ледосбору между двух выводных ледников, перемещаются с меньшими на порядок скоростями, около 1–2 м в год.

Сравнение натуральных измерений скорости течения льда с данными, полученными на основе дистанционного зондирования, показывает хорошее согласование ($r = 0.93$), но датасет MEaSUREs систематически занижает скорости ледника в исследуемом районе, в среднем на 24% (см. рис. 2). Такое занижение невозможно объяснить несовершенством методов обработки радарных данных: спутниковые измерения скоростей многократно сравнивались и с натурными измерениями, и с математическими моделями, и подобной систематической ошибки выявлено не было (см., например, Arthern et al., 2015). По последним оценкам, погрешность дистанционных измерений скоростей ледников при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой составляет порядка 20 см в год, т.е. много меньше выявленного расхождения (Mouginot et al., 2019). Следовательно, в 2022–2025 гг. ледниковый щит в районе станции Прогресс действительно увеличил среднюю скорость своего течения. Точные даты радарных изображений, использованных для формирования карты скоростей в датасете MEaSUREs, неизвестны; и мы знаем лишь, что в него вошли материалы съёмки 2007–2009 и 2013–2016 гг., и поэтому отнести выявленный нами рост скоростей на 24% к конкретному периоду времени невозможно.

Вывод об ускорении движения ледникового щита согласуется с другими подобными исследованиями в окраинной зоне Антарктиды. Так, по данным спутника Sentinel-1 за 2014–2021 гг. выявлено увеличение скоростей льда на Антарктическом полуострове в летний сезон на $12.4 \pm 4.2\%$, с наибольшим ускорением отдельных ледников на $22.3 \pm 3.2\%$ (Wallis et al., 2023). Для Восточной Антарктиды о схожем увеличении скоростей сообщалось для выводного ледника Polar Record, расположенного вблизи рассматриваемого района и также впадающего в залив Прюдс: на основе спутниковой съёмки оптического спектра показано, что ускорение за период с 2005 по 2015 г. составило 15% (Liang et al., 2019). А для ледника Долк, на востоке рассматриваемого района, ранее представлен ещё более продолжительный ряд скоростей за 2000–2019 гг. (Chen et al., 2020). Несмотря на то, что

изменение скорости движения ледника носит циклический характер, с краткосрочным ускорением после откалывания крупных айсбергов с фронта, в рядах скоростей также наблюдается положительный тренд.

Выявленный рост скорости течения льда увеличивает динамическую составляющую расходной части баланса массы Антарктического ледникового щита в исследуемом районе. Если принять поперечное сечение выводных ледников примерно постоянным во времени, то транспортируемый через это сечение объём ледника увеличится в то же количество раз, что и скорость. Приведённые выше примеры показывают, что ускорение фиксируется сразу для ряда ледников, впадающих в залив Прюдс — следовательно, сток ледникового льда с Восточно-Антарктического щита в залив в последнее десятилетие увеличивается. Это примечательно по той причине, что ледосбор залива Прюдс — один из наиболее крупных в Антарктиде, составляющий около 16% от общей площади Восточно-Антарктического щита (Hodgson et al., 2016).

Зоны трещин и строение приповерхностной части ледника. Для решения задачи обеспечения безопасности логистических операций основной целью георадиолокационных исследований является картирование зон трещин и установление их основных геометрических характеристик. При этом исследовалась только приповерхностная часть ледника: выбранные параметры съёмки (развёртка 200 нс) обеспечивали глубинность исследования, не превышающую в снежно-фирновых средах 17 м; глубинное строение ледника и характер его ложа в рамках исследования не изучалось.

Характерный пример георадарного разреза по участку работ приводится на рис. 3, а. Приповерхностная часть ледника в районе работ сложена фирном, перекрытым слоем снега переменной мощности. В пользу этого свидетельствует ярко выраженная слоистость зондируемой толщи, что характерно для фирна и является следствием неравномерного годового снегонакопления. Дополнительно по годографам дифрагированных волн выполнены эпизодические оценки относительной диэлектрической проницаемости, которая составила в среднем 2.6 единиц, что также характерно для фирна. Трещины (см. рис. 3, а) в пределах участка работ характеризуются каплевидной в разрезе формой, расширяясь с глубиной. Ширина трещин в приповерхностной части не превышала 0.4 м, при этом в ряде случаев достигала значения 3.1 м на глубине 10 м.

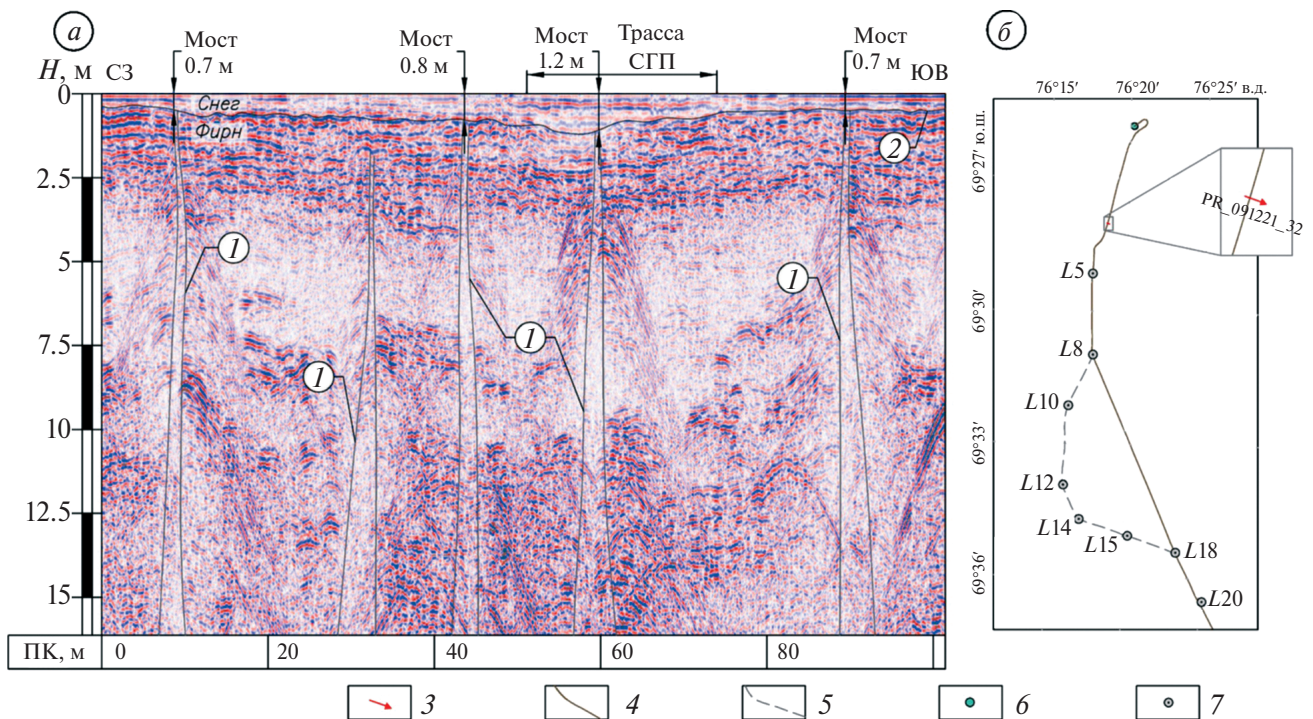


Рис. 3. Пример мониторингового георадарного профиля по трассе санно-гусеничных походов (СГП): разрез по профилю PR_091221_32 (а), схема расположения (б).

I – трещины; 2 – граница снега и фирна; 3 – положение профиля; 4 – положение трассы СГП, спрямлённой по результатам работ 67-й РАЭ; 5 – предыдущее положение трассы СГП; 6 – пункт формирования СГП; 7 – маршрутные точки трассы СГП

Fig. 3. An example of a monitoring GPR section at the inland traverse route: GPR section along the line PR_091221_32 (a), location scheme (b).

I – crevasses; 2 – snow and firn boundary; 3 – location of the line; 4 – location of the inland traverse route according to the results of the 67th RAE; 5 – former location of the inland traverse route; 6 – initial point for the inland traverse; 7 – inland traverse route points

Несмотря на то, что форма и геометрические характеристики всех выявленных на участке трещин схожи, их пространственная ориентировка в разных зонах меняется (рис. 4). В рамках зоны трещин, расположенной вблизи ПП Зенит (см. рис. 4, *I–II*), трещины ориентированы в целом по линии север-северо-запад – юг-юго-восток. На участке, наиболее удалённом от ПП Зенит (см. рис. 4, *IV*), ориентировка трещин идёт по линии северо-запад–юго-восток. На отрезке старой трассы, который в данный момент не эксплуатируется (см. рис. 4, *III*), трещины ориентированы с севера на юг.

Соотношение направления удлинения трещин и направления движения ледника различается в пределах разных зон. На врезке (см. рис. 4, *I*) угол между трещинами и векторами течения ледовых масс составляет в среднем 21 градус, тогда как на врезках (см. рис. 4, *II; IV*) трещины практически сонаправлены с ними. Следовательно, очевидная корреляция меж-

ду характером движения ледника в приповерхностной части и формированием трещин здесь отсутствует. Расчёт и моделирование механизма формирования трещин в задачи исследования не входили, но полученные данные могут послужить для выполнения таких специальных расчётов в дальнейшем.

Снегонакопление. Результаты измерений снегонакопления по сезонам показаны на рис. 5. Антарктической зимой (с февраля–марта по ноябрь), ожидаемо, в среднем по рейкам наблюдается накопление; летом (с ноября по февраль–март) высота снежно-ледовой поверхности понижается, но не повсеместно. Средняя величина изменения высоты снега летом может быть и околонулевой (лето 2022/23 г.), и положительной (холодный летний сезон 2023/24 г.), и отрицательной (тёплый сезон 2024/25 г.). В среднем за балансый год (за начало принят март) в рассматриваемый период наблюдалась аккумуляция от 23 до 71 см.

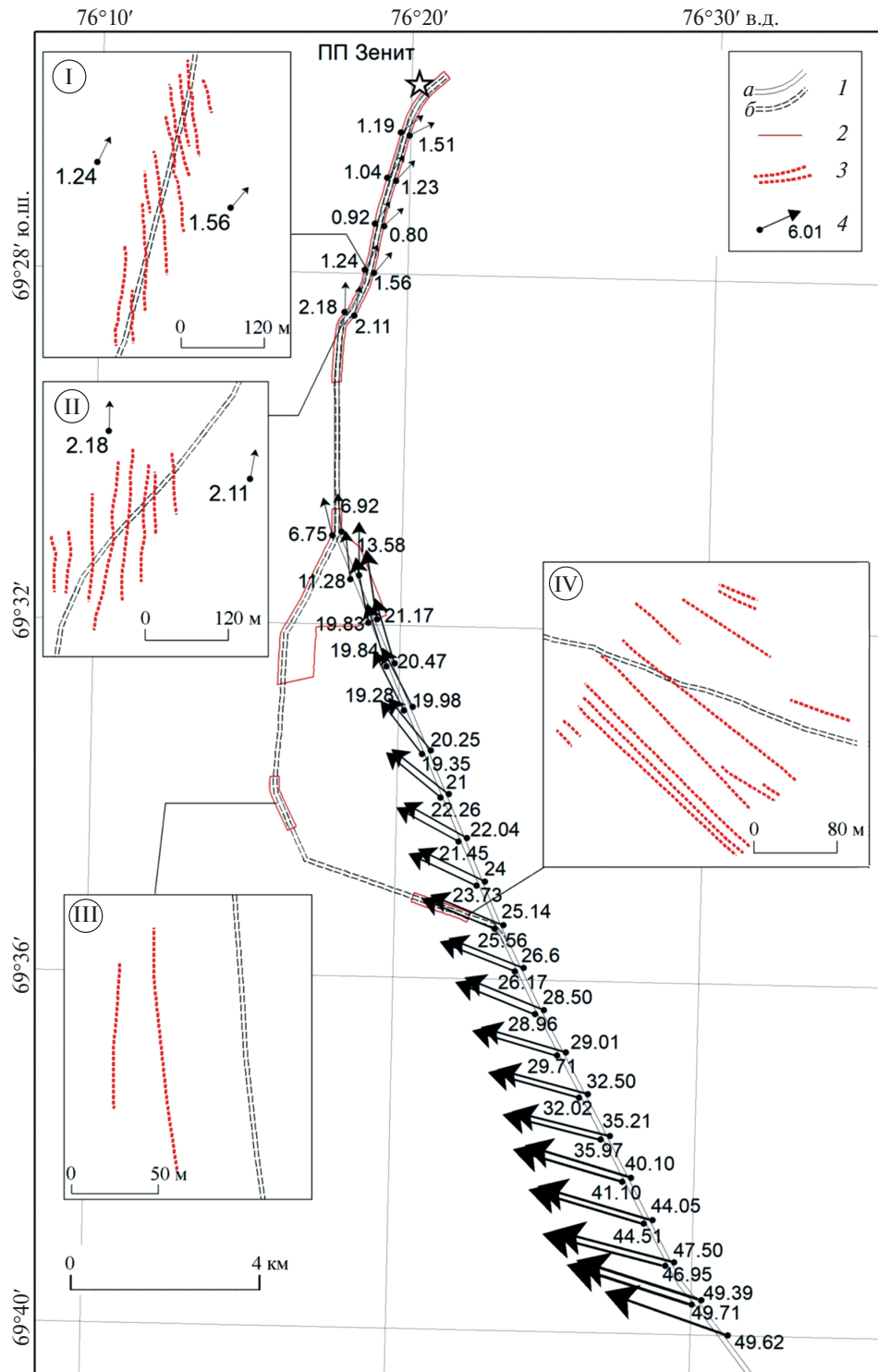


Рис. 4. Зоны трещин вблизи трассы санно-гусеничных походов (СГП) в сопоставлении с измеренными величиной и направлением смещения вех.

1 – трасса СГП (*a* – фактическое положение, *б* – предыдущий отрезок); 2 – зоны трещин; 3 – интерполированное положение трещин на детальных схемах; 4 – гляциологические вехи (длина стрелок пропорциональна смещению, числами показана величина смещения в м/год)

Fig. 4. Crevasse zones near the inland traverse route compared with the measured magnitude and direction of the displacement of the glacial stakes.

1 – inland traverse route (*a* – actual location, *b* – former part); 2 – crevasse zones; 3 – interpolated location of the crevasses at the detailed schemes; 4 – glaciological stakes (length of the arrows is proportional to the displacement, the numbers show displacement magnitude, meters per year)

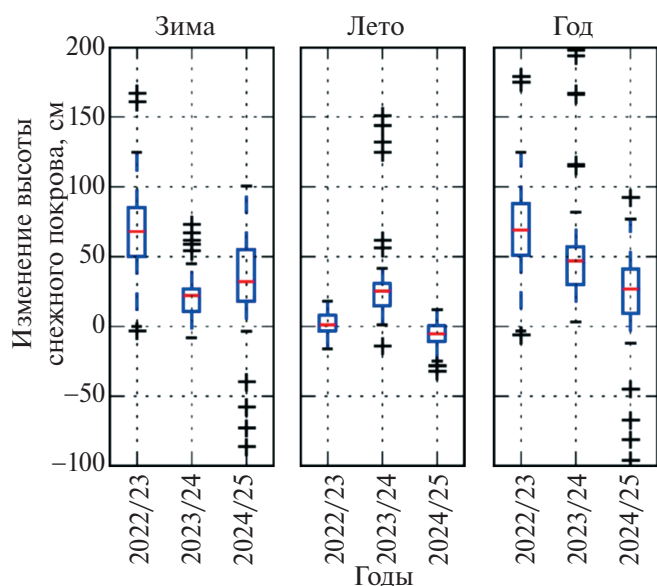


Рис. 5. Изменение высоты снежного покрова, измеренное по рейкам в рассматриваемом районе, за балансный год и за отдельные сезоны

Fig. 5. Temporal variation of snowpack height measured by stake observations in the study area over the balance year and individual seasons

Зависимость от рельефа. При рассмотрении зависимости снегонакопления вдоль трассы СГП от рельефа видно (рис. 6, *a–в*), что в 2022/23 и 2023/24 гг. высотный градиент снегонакопления, рассчитанный путём аппроксимации линейной зависимостью, составил около 5 см на 100 м высоты (4.7 и 5.6 см соответственно). Схожие измерения за более ранний период представлены в статье (Jat et al., 2023). Рейки распределены по той же площади, где расположен профиль. Схемы расстановки реек, однако, не совпадают, что препятствует получению единого однородного временного ряда; тем не менее для этих данных также проанализирована высотная зависимость снегонакопления (см. рис. 6, *г–ж*). Высотный градиент по сезонам составил: 1.4, 8.6, 3.1, -0.1 см. Однако практически за все годы (кроме 2019 г.) зависимость от высоты статистически не значима (при $\alpha = 0.05$), а коэффициент линейной корреляции не превышает 0.60. Тем не менее для всех лет наблюдений выделяется следующая закономерность: в годы с большей аккумуляцией больше проявляется высотный градиент, а в годы с меньшей аккумуляцией (или большим таянием) — высотный градиент практически отсутствует.

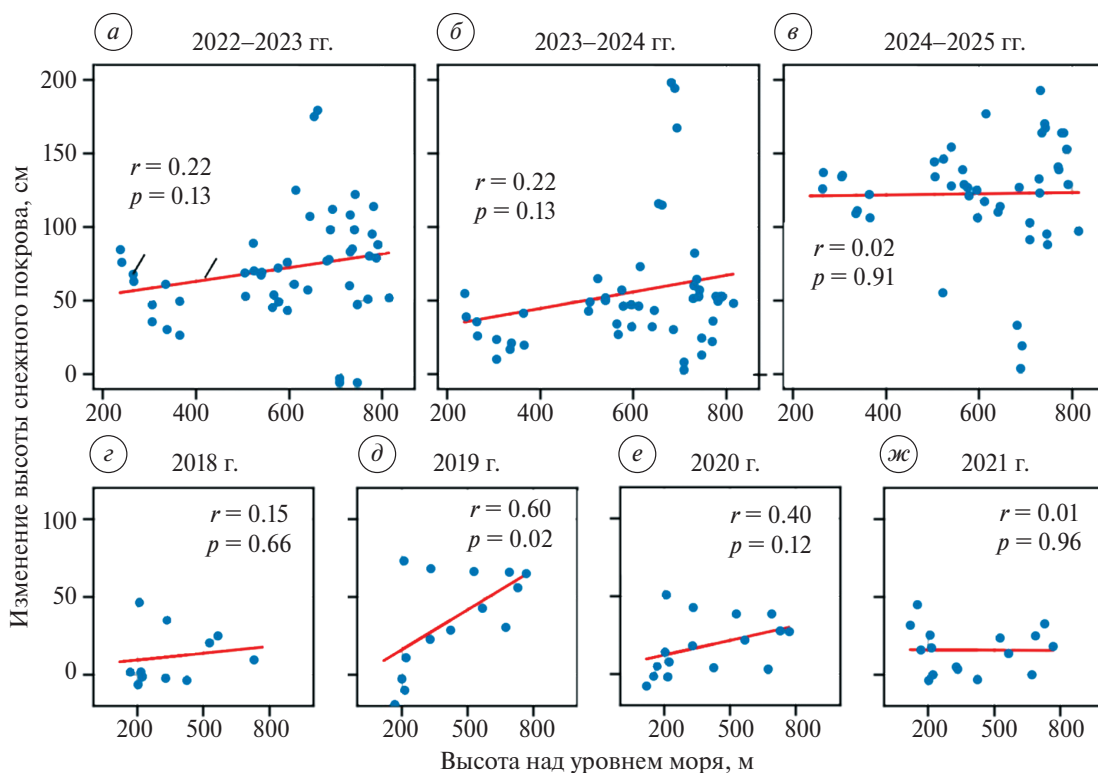


Рис. 6. Зависимость годового изменения высоты снежного покрова от высоты для исследуемого района: (*a–в*) — измерения авторов, (*г–ж*) — измерения гляциологов станции Бхарати (по Jat et al., 2023).

1 — измеренные значения, 2 — линейная аппроксимация

Fig. 6. Dependence of the annual change in snowpack height on elevation for the study area: (*a–в*) — author's measurements; (*г–ж*) — measurements by Bharati Station glaciologists (after Jat et al., 2023).

1 — measured values; 2 — linear fit

Видно (см. рис. 6), что разброс измерений относительно “идеальной” аппроксимирующей прямой велик, что может свидетельствовать о значительном влиянии ветрового перераспределения снега. Такой шум имеет практическое следствие для масс-балансовых расчётов, значительно затрудняя пространственную интер- и экстраполяцию полученных измерений на основе вертикального профиля снегонакопления. Рассмотрим дополнительные факторы, которые могут влиять на распределение измеренных значений, и проверим гипотезу о ветровом перераспределении.

Действительно, для всех сезонов, за исключением зимы 2024/25 г., существует зависимость изменения высоты снежного покрова от экспозиции участка местности, где расположена снегомерная рейка. Максимум снегонакопления наблюдается на участках восточной-юго-восточной экспозиции, и убывает до минимума на юго-восточных

участках (рис. 7). Это хорошо совпадает с преобладающим направлением ветра за все сезоны – восточным, т.е. накопление снега ожидаемо происходит на подветренных участках. Аномалию зимы 2024/25 г. с точки зрения ветра объяснить сложно, поскольку преобладающее направление никак не отличалось от других рассматриваемых сезонов.

При обобщении результатов предыдущих исследований снежного покрова Антарктиды отмечалось, что главенствующая роль в прибрежных районах в зимний период принадлежит ветру, а в летний – солнечной радиации (Котляков, 2020). Результаты измерений свидетельствуют в пользу того, что и летом главенствует зависимость от ветра. Продемонстрированная ранее зависимость от экспозиции действительно может быть интерпретирована двояко: не только как опосредующая ветровое воздействие, но и как отражающая неравномерность инсоляции. Од-

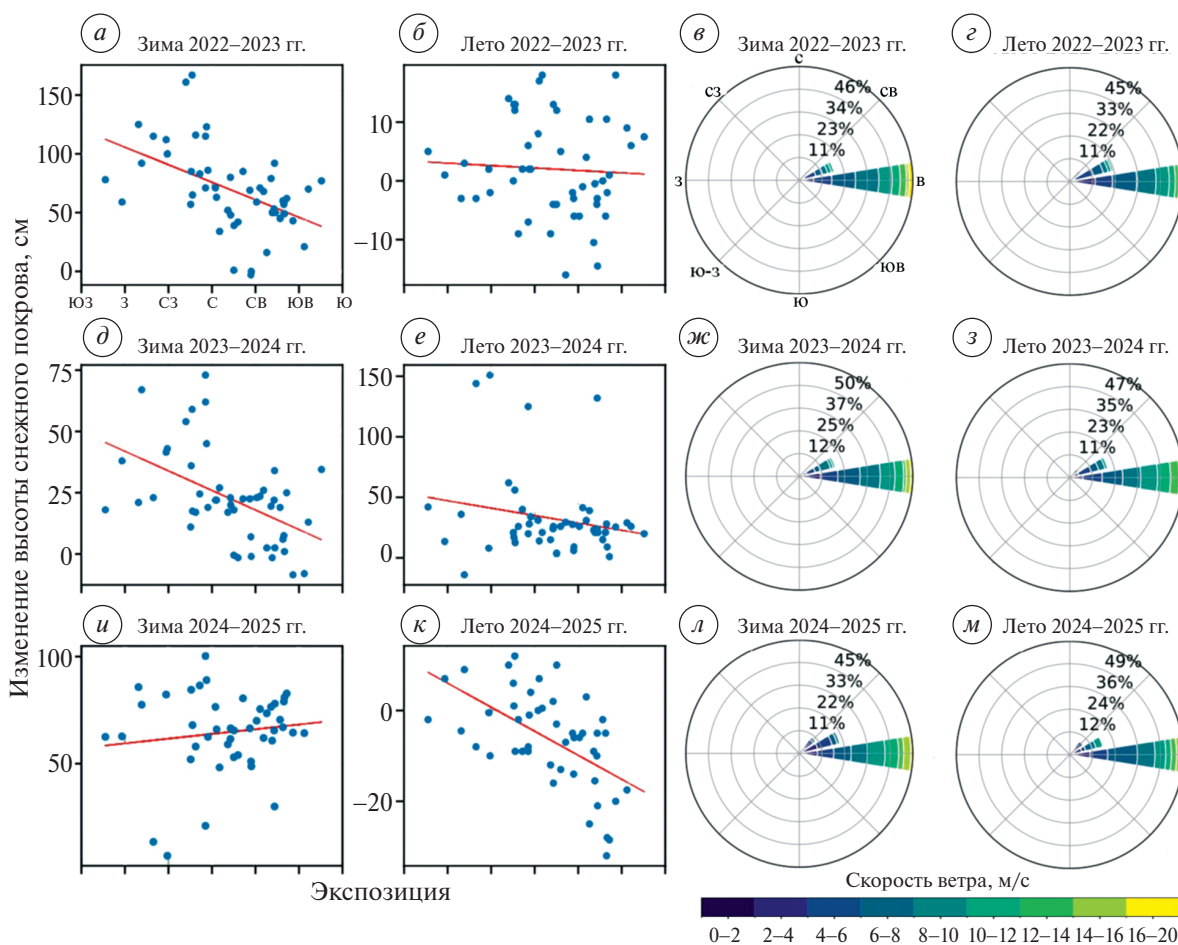


Рис. 7. Зависимость изменений высоты снежного покрова от экспозиции места измерений (а, б, д, е, и, к) и розы ветров на метеостанции Прогресс (в, г, ж, з, л, м)
Fig. 7. Dependence of changes in snowpack height on slope aspect at the measurement (a, б, д, е, и, к) and wind roses at the Progress weather station (в, г, ж, з, л, м)

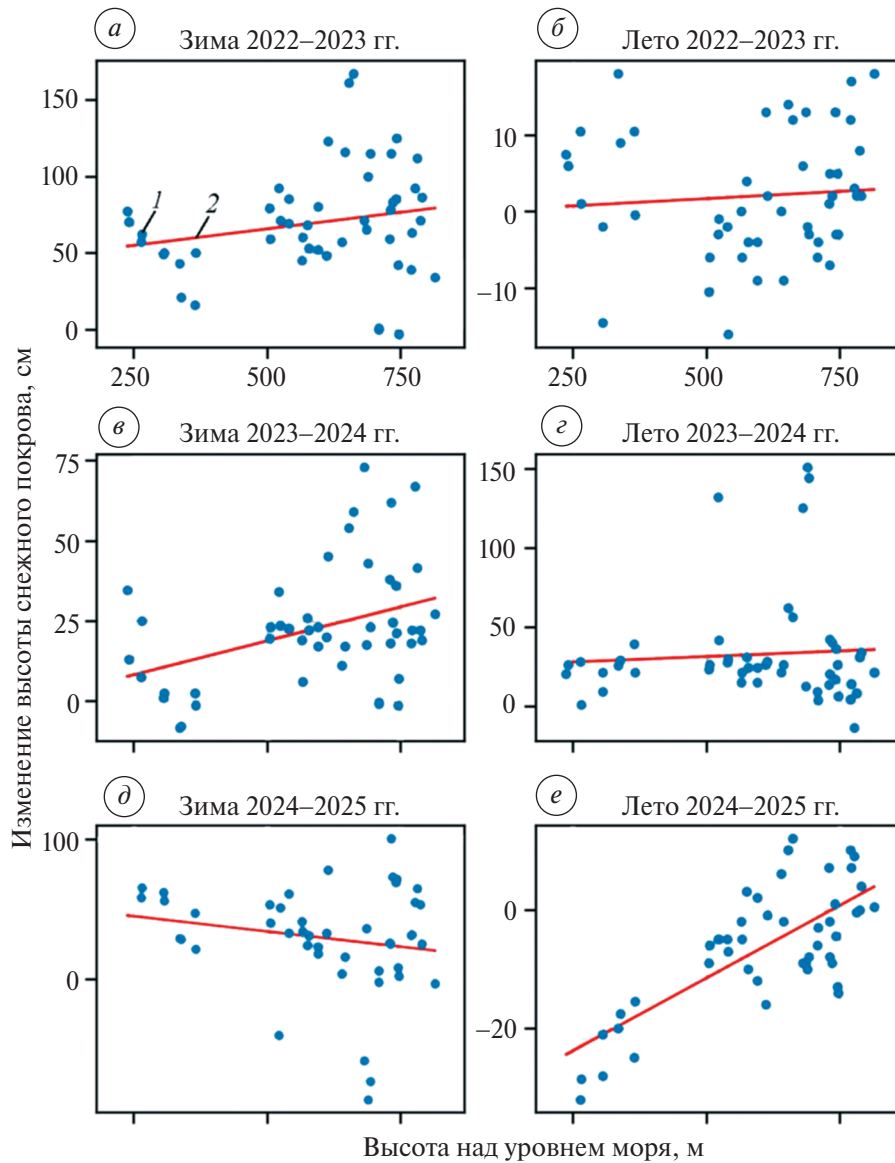


Рис. 8. Зависимость изменения высоты снежного покрова от высоты над уровнем моря, по отдельным сезонам: 1 – измеренные значения, 2 – линейная аппроксимация

Fig. 8. Dependence of changes in snowpack height on elevation for individual seasons: 1 – measured values; 2 – linear fit

нако для исследуемой территории действие двух этих факторов перпендикулярно друг другу: наветренные и подветренные области расположены по оси восток–запад, а максимум и минимум инсоляции – по оси север–юг. Ни в один из летних сезонов не фиксируется максимума снеготаяния на участках северной экспозиции, которые должны быть наиболее освещены в южном полушарии, и наоборот: наиболее интенсивное снижение высоты поверхности снежного покрова отмечено на наименее освещённых участках юго-восточной экспозиции. Тем самым определяющая роль коротковолновой радиации летом измерениями не подтверждается.

Межгодовая изменчивость. В конце 2024 г. на Антарктическом континенте по данным дистанционного зондирования зафиксирована рекордная площадь поверхностного таяния. В декабре 2024 г. этот показатель приблизился к 4% площади ледникового щита, что стало самым высоким значением за историю спутниковых наблюдений (Surge in Antarctica's melting, 2025). Агентство NOAA связало это явление с повышением температуры воздуха на 2 °C выше нормы, охватившее также и прибрежные районы Восточной Антарктиды (The Great Un-Freezing..., 2025), включая исследуемую территорию в районе залива Прюдс и в особенности шельфовые ледники.

По данным полевых измерений, снегонакопление в 2024/25 балансовом году действительно было ниже, чем в два предшествующих года, но тем не менее осталось в среднем положительным (см. рис. 5). При этом абляция в летний сезон наблюдалась до высоты около 750 м (рис. 8, е).

В работе Kumar et al. (2023) приведены данные снегонакопления в том же районе за период предшествующих работ (2013/14 и 2019/20 гг.). Совместный анализ всех доступных измерений (шесть балансовых лет из статьи Kumar и соавторов и три балансовых года работ авторов) показывает, что более половины межгодовой изменчивости ($R^2 \sim 0.61$) снегонакопления в исследуемом районе достаточно хорошо объясняется годовыми суммами положительных температур (рис. 9). Это примечательно, поскольку основным фактором, влияющим на снегонакопление в Антарктиде в целом, считаются именно осадки (Hansen et al., 2021). В этом нет противоречий, поскольку прибрежные области, к тому же расположенные сравнительно невысоко над уровнем моря, действительно могут иметь особенности снегонакопления, отличные от областей в глубине континента.

Зависимость снегонакопления в исследуемом районе от других метеорологических факторов исследовать затруднительно. Для других секторов Антарктики, например, для Земли Королевы Мод, отмечалось значительное влияние на про-

цесс аккумуляции так называемых атмосферных рек – короткоживущих атмосферных образований, осуществляющих транспорт большого количества влаги из тропических или субтропических широт в полярные (Gorodetskaya et al., 2013). Показано, что ливневые осадки на антарктическом побережье, вызванные действием таких явлений, могут на протяжении нескольких суток принести десятки процентов от годовой суммы твёрдых осадков (Gorodetskaya et al., 2014). Поэтому поиск зависимостей с осреднёнными за год метеовеличинами может быть бесперспективным, в отличие от подробного рассмотрения их внутрисезонного хода, для чего в нашем распоряжении недостаточны данные.

Кроме того, в ряде работ отмечена зависимость количества выпадающих осадков (Marshall et al., 2017), а также баланса массы прибрежной зоны Антарктического щита (Hansen et al., 2021) от атмосферных индексов, главенствующим из которых называют индекс антарктического колебания (Southern Annular Mode, SAM) (Matsuoka et al., 2025). Однако влияние подобных атмосферных индексов чаще проявляется на несколько больших временных масштабах и требует для анализа более продолжительных временных рядов натурных измерений – поэтому такой вопрос требует дальнейшего изучения и продолжения полевых работ.

ВЫВОДЫ

Представлены материалы исследования строения и динамики ледникового щита в прибрежной зоне (примерно до 30 км вглубь континента) восточной части Антарктического ледникового щита, в районе полярной станции Прогресс, за 2022/23–2024/25 гг. Главным прикладным результатом исследования стало формирование рекомендаций по безопасной эксплуатации трассы санно-гусеничного похода. Выявлено, что в пределах обследованного коридора шириной 200 м трасса в целом безопасна. Зоны трещин, ширина которых в приповерхностной части ледника не превышает 0.4 м, не представляли серьёзной угрозы для выполнения логистических операций. А наличие точных данных о направлении и скорости движения ледника вдоль трассы позволяет прогнозировать её возможное отклонение за пределы безопасного коридора и своевременно корректировать положение в будущем.

За все три балансовых года отмечено увеличение высоты снежно-фирновой поверхно-

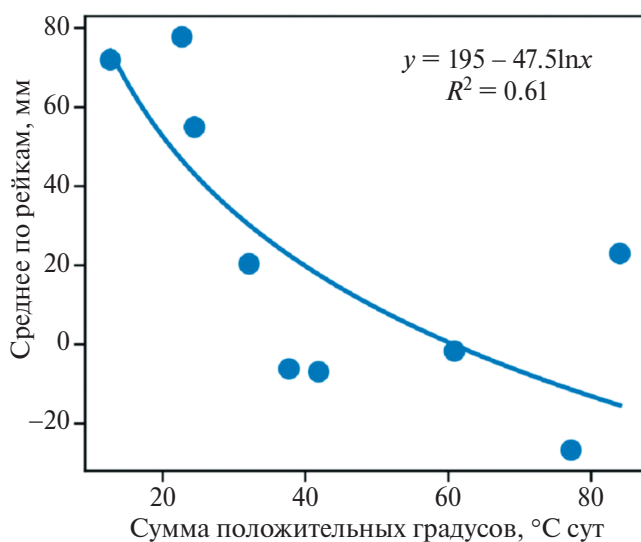


Рис. 9. Зависимость изменения высоты снежного покрова в районе станции Прогресс от годовой суммы положительных температур

Fig. 9. Dependence of snow cover height changes in the Progress station area on the annual sum of positive temperatures

сти: +71, +55 и +23 см соответственно. Сравнение с результатами ранее опубликованных работ показало, что межгодовая изменчивость снегонакопления в последнее десятилетие (т.е. в 2013/14–2024/25 гг.) имеет довольно высокую корреляцию с годовыми суммами положительных градусо-дней ($r = -0.70$): этим может объясняться до половины вариации исследуемой величины. Это примечательно, поскольку для Антарктиды в целом и для некоторых прибрежных районов известно, что основным фактором аккумуляции служат осадки.

Для понимания пространственного распределения изменений высоты снежного покрова показана зависимость от высоты над уровнем моря и от преобладающего направления ветра. Вертикальный градиент составил около 5 см снега на 100 м высоты, а по предыдущим измерениям — до 8.6 см снега на 100 м, однако в некоторые годы подобная зависимость оказывается вовсе незначима. Также наблюдается зависимость от экспозиции: накопление максимально на участках юго-восточной экспозиции и минимально на противоположной, что можно связать с преобладающим направлением кatabатических ветров. Зависимости от инсоляции выявить не удалось, и даже в летний сезон ведущим фактором формирования снежной поверхности ледникового щита остаётся именно ветер.

Измеренные скорости движения льда составили 6.7–49.8 м в год в верхней части профиля, относящейся к верховьям выводного ледника Поларорбокен, и 0.75–2.15 м в год в нижней части, расположенной в пределах невыводного участка ледникового щита. Сравнение натуральных измерений скорости течения льда с предыдущими оценками (относящимися к периоду 2007–2016 гг.) показало, что движение ледника Поларорбокен за 10–15 лет ускорилось в среднем на 24%, увеличив динамическую составляющую расходной части бюджета его массы. В последнее десятилетие схожее поведение отмечалось и на соседних выводных ледниках, что должно существенно увеличить приток ледникового льда в залив Прюдс.

Другие отдельные виды анализа, представляющие научный интерес (например, выявление связей с атмосферными индексами), требуют более длительных рядов натуральных наблюдений, потому в дальнейшем планируется продолжение исследований.

Благодарности. Полевые работы выполнены за счёт средств субсидии на финансовое обе-

спечение выполнения государственного задания на выполнение работ по проведению 65-й, 67-й – 70-й Российской антарктической экспедиции. Исследование также связано с Проектом 5.2 “Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктики и Южного океана Плана НИТР/ОПР Росгидромета (2025–2029 гг.)”.

Авторы выражают благодарность руководству РАЭ и коллегам по полевым работам, в особенности Д.А. Емельянову и Д.А. Орлову, за организацию и обеспечение выполненных работ.

Цифровая модель REMA, использованная в работе, создана организациями Byrd Polar and Climate Research Center и Polar Geospatial Center по грантам NSF-OPP номер 1043681, 1542736, 1543501, 1559691, 1810976 и 2129685.

Acknowledgments. Fieldwork was carried out with funding from the subsidy for the financial support of the state assignment to conduct the 65th and 67th–70th Russian Antarctic Expeditions. The study is also related to Project 5.2 “Comprehensive oceanographic, climatic, glaciological, and geophysical studies of Antarctica and the Southern Ocean” under the Research and Development Plan of Roshydromet (2025–2029).

The authors express their gratitude to the leadership of the Russian Antarctic Expedition and colleagues involved in the fieldwork, especially D.A. Emelyanov and D.A. Orlov, for organizing and supporting the work performed.

The REMA digital elevation model used in this study was created by the Byrd Polar and Climate Research Center and the Polar Geospatial Center under NSF-OPP grants 1043681, 1542736, 1543501, 1559691, 1810976, and 2129685.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Котляков В.М.* Что нового мы узнали о снеге и льде в Антарктиде в период Международного геофизического года и в последующие 10–20 лет // Вопросы географии. 2020. Т. 150. С. 75–99. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45627899>
- Расписание погоды // Электронный ресурс. URL: <https://rp5.ru/> (Дата обращения: 29.08.2025).
- Arthern R.J., Hindmarsh R.C.A., Williams C.R.* Flow speed within the Antarctic ice sheet and its controls inferred from satellite observations // Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2015. V. 120. P. 1171–1188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014JF003239>

- Chen Y., Zhou C., Ai S., Liang Q., Zheng L., Liu R., Lei H. Dynamics of Dalk Glacier in East Antarctica Derived from Multisource Satellite Observations Since 2000 // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 11. 1809 p. <https://doi.org/10.3390/rs12111809>
- Ding M., Zou X., Sun Q., Yang D., Zhang W., Bian L., Lu C., Allison I., Heil P., Xiao C. The PANDA automatic weather station network between the coast and Dome A, East Antarctica // *Earth System Science Data.* 2022. V. 14. P. 5019–5035. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5019-2022>
- Gorodetskaya I.V., van Lipzig N.P.M., van den Broeke M.R., Mangold A., Boot W., Reijmer C.H. Meteorological regimes and accumulation patterns at Utsteinen, Dronning Maud Land, East Antarctica: Analysis of two contrasting years // *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere.* 2013. V. 118. P. 1700–1715. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50177>
- Gorodetskaya I.V., Tsukernik M., Claes K., Ralph M.F., Neff W.D., van Lipzig N.P.M. The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica // *Geophys. Research Letters.* 2014. V. 41. P. 6199–6206. <https://doi.org/10.1002/2014GL060881>
- Hansen N., Langen P.L., Boberg F., Forsberg R., Simonson S.B., Thejll P., Vandecrux B., Mottram R. Down-scaled surface mass balance in Antarctica: impacts of subsurface processes and large-scale atmospheric circulation // *The Cryosphere.* 2021. V. 15. P. 4315–4333. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4315-2021>
- Hodgson D.A., Whitehouse P.L., De Cort G., Berg S., Verleyen E., Tavernier I., Vyverman W., Sabbe K., O'Brien P. Rapid early Holocene sea-level rise in Prydz Bay, East Antarctica // *Global Planetary Change.* 2016. V. 139. P. 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.020>
- The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2 // Электронный ресурс. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/EBW8UC> (Дата обращения: 26.06.2025)/
- IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jat S., Sadiq M., Kumar P., Verma A., Gajbhiye D.Y. Surface mass balance calculation with ground observation in the sub-basin of Larsemann Hills, East Antarctica // *Polar Science.* 2023. V. 38. 100981 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1873965223000798>
- Kumar P., Verma A., Gajbhiye D., Chandra V., Goswami A., Dutta S. Impact of Changing Climate Over Polar Ice Sheet: A Case Study from Larsemann Hills, East Antarctica // *Climate Change and Environmental Impacts: Past, Present and Future Perspective.* Cham: Springer Int. Publ., 2023. P. 189–204. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-13119-6_10
- Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R. The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation // *Geophys. Research Letters.* 2017. V. 44. № 22. P. 11580–11589. <https://doi.org/10.1002/2017GL075998>
- Matsuoka K., Moholdt G., Arthur J. Towards an improved understanding of the Antarctic coastal zone and its contribution to future global sea level // *ESS Open Archive.* 2025. <https://doi.org/10.22541/essoar.175241971.1985104>
- Liang Q., Zhou C., Howat I.M., Jeong S., Liu R., Chen Y. Ice flow variations at Polar Record Glacier, East Antarctica // *Journ. of Glaciology.* 2019. V. 65 № 250. P. 279–287. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.6>
- Mouginot J., Rignot E., Scheuchl B. Continent-wide, interferometric SAR phase, mapping of Antarctic ice velocity // *Geophys. Research Letters.* 2019. V. 46. P. 9710–9718. <https://doi.org/10.1029/2019GL083826>
- Otosaka I.N., Shepherd A., Ivins E.R., Schlegel N.-J., Amory C., van den Broeke M.R. Mass balance of the Greenland and Antarctic ice sheets from 1992 to 2020 // *Earth System Science Data.* 2023. V. 15. № 4. P. 1597–1616. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>
- Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B. MEaSURES InSAR-Based Antarctica Ice Velocity Map, Version 2. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2017 // Электронный ресурс. URL: <https://doi.org/10.5067/D7GK8F5J8M8R> (Дата обращения: 26.08.2025).
- Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I. Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica // *Cryosphere.* 2021. V. 15. P. 2667–2682. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2667-2021>.
- Surge in Antarctica's melting. National Snow and Ice Data Center // Электронный ресурс. URL: <https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/surge-antarcticas-melting-new-year-arrives> (Дата обращения: 29.08.2025).
- The Great Un-Freezing: Record Antarctic surface melt extent set; Peninsula melting slows. National Snow and Ice Data Center // Электронный ресурс. URL: <https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/great-un-freezing-record-antarctic-surface-melt-extent-set-peninsula-melting-slows> (Дата обращения: 29.08.2025).
- Wallis B.J., Hogg A.E., van Wessem J.M., Davison B.J., van den Broeke M.R. Widespread seasonal speed-up of west Antarctic Peninsula glaciers from 2014 to 2021 // *Nat. Geoscience.* 2023. V. 16. P. 231–237. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01131-4>
- Zeng Z., Wang Z., Ding M., Zhang B. Estimation and long-term trend analysis of surface solar radiation in Antarctica: a case study of Zhongshan Station // *Adv. Atmosphere Science.* 2021. V. 38. P. 1497–1509. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0386-6>

Citation: *Terekhov A.V., Prokhorova U.V., Grigorieva S.D., Kuznetsova M.R.* Structure and Dynamics of the Near-surface Layer of the East Antarctic Ice Sheet near the Progress Station (Prydz Bay Area), 2022–2025. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 226–242. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020018

Structure and Dynamics of the Near-surface Layer of the East Antarctic Ice Sheet near the Progress Station (Prydz Bay Area), 2022–2025

© 2026 A. V. Terekhov*, U. V. Prokhorova, S. D. Grigorieva, M. R. Kuznetsova

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: avterekhov@aari.ru

Received October 28, 2025; revised December 25, 2025; accepted March 23, 2026

Measurements of snow accumulation and rates of the ice sheet flow supplemented with data of a ground-penetrating radar (GPR) were carried out within the coastal zone of East Antarctica (near the Progress Station). On the average, changes in the snow depth for the 2022/23–2024/25 period were equal to +71, +55, and +23 cm per each balance year. Over the past decade, the interannual variability in snow accumulation has been explained to some extent by the sum of positive degree-days, while its spatial distribution depends on altitude and prevailing wind direction. It has been shown that initial 30 km of the inland traverse route between the Stations Progress and Vostok belong to different ice catchments. The measured ice-flow rates were within the range 6.8–49.7 m/year at the distant part of the profile located in the upper reaches of the Polarboken Glacier, and only 0.8–2.2 m/year at the near part located within the non-outlet area of the ice sheet. Comparison with the historical data indicated that the glacier's flow accelerated by an average of 24% over the past 10–15 years. Existence of similar trends in the neighboring outlet glaciers allows making a conclusion about a significant influx of glacier ice into the Prydz Bay. Several zones of crevasses characterized by a teardrop-shaped cross-section were discovered within the study area. The width of crevasses in the near-surface part does not exceed 0.4 m, but reaches 3.1 m at the depth of 10 m. No correlation was found between the direction of the crevasses and the ice-flow direction.

Keywords: accumulation, Antarctica, ice flow rate, mass balance, snow cover, climate change, glacial crevasses, ground-penetrating radar, Larsemann Hills

REFERENCES

- Kotlyakov V.M.* What new have we learned about snow and ice in Antarctica during the International Geophysical Year and in the following 10–20 years. *Voprosy geografii*. Questions of Geography. 2020, 150: 75–99. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45627899> [In Russian].
- Weather schedule. Retrieved from: URL: <https://rp5.ru/> (Last access: August 29, 2025). [In Russian].
- Arthern R.J., Hindmarsh R.C.A., Williams C.R.* Flow speed within the Antarctic ice sheet and its controls inferred from satellite observations. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2015, 120: 1171–1188. <https://doi.org/10.1002/2014JF003239>
- Chen Y., Zhou C., Ai S., Liang Q., Zheng L., Liu R., Lei H.* Dynamics of Dalk Glacier in East Antarctica Derived from Multisource Satellite Observations Since 2000. *Remote Sensing*. 2020, 12(11): 1809. <https://doi.org/10.3390/rs12111809>
- Ding M., Zou X., Sun Q., Yang D., Zhang W., Bian L., Lu C., Allison I., Heil P., Xiao C.* The PANDA automatic weather station network between the coast and Dome A, East Antarctica. *Earth System Science Data*. 2022, 14: 5019–5035. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5019-2022>
- Gorodetskaya I.V., van Lipzig N.P.M., van den Broeke M.R., Mangold A., Boot W., Reijmer C.H.* Meteorological regimes and accumulation patterns at Utsteinen, Dronning Maud Land, East Antarctica: Analysis of two contrasting years. *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere*. 2013, 118: 1700–1715. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50177>
- Gorodetskaya I.V., Tsukernik M., Claes K., Ralph M.F., Neff W.D., van Lipzig N.P.M.* The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 6199–6206. <https://doi.org/10.1002/2014GL060881>
- Hansen N., Langen P.L., Boberg F., Forsberg R., Simonsen S.B., Thejll P., Vandecrux B., Mottram R.* Down-scaled surface mass balance in Antarctica: impacts of subsurface processes and large-scale atmospheric circulation. *Cryosphere*. 2021, 15: 4315–4333. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4315-2021>

- Hodgson D.A., Whitehouse P.L., De Cort G., Berg S., Verleyen E., Tavernier I., Vyverman W., Sabbe K., Berg S., O'Brien P.* Rapid early Holocene sea-level rise in Prydz Bay, East Antarctica. *Global Planetary Change*. 2016, 139: 128–140.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.020>
- The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2. Retrieved from: URL:
<https://doi.org/10.7910/DVN/EBW8UC> (Last access: June 26, 2025).
- IPCC.* Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023: 184 p.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jat S., Sadiq M., Kumar P., Verma A., Gajbhiye D.Y.* Surface mass balance calculation with ground observation in the sub-basin of Larsemann Hills, East Antarctica. *Polar Science*. 2023, 38: 100981 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1873965223000798>
- Kumar P., Verma A., Gajbhiye D., Chandra V., Goswami A., Dutta S.* Impact of Changing Climate Over Polar Ice Sheet: A Case Study from Larsemann Hills, East Antarctica. *Climate Change and Environmental Impacts: Past, Present and Future Perspective*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 189–204.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-13119-6_10
- Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R.* The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation. *Geophys. Research Letters*. 2017, 44 (22): 11580–11589.
<https://doi.org/10.1002/2017GL075998>
- Matsuoka K., Moholdt G., Arthur J.* Towards an improved understanding of the Antarctic coastal zone and its contribution to future global sea level. *ESS Open Archive*. 2025.
<https://doi.org/10.22541/essoar.175241971.1985104>
- Liang Q., Zhou C., Howat I.M., Jeong S., Liu R., Chen Y.* Ice flow variations at Polar Record Glacier, East Antarctica. *Journ. of Glaciology*. 2019, 65 (250): 279–287.
<https://doi.org/10.1017/jog.2019.6>
- Mouginot J., Rignot E., Scheuchl B.* Continent-wide, interferometric SAR phase, mapping of Antarctic ice velocity. *Geophys. Research Letters*. 2019, 46: 9710–9718.
<https://doi.org/10.1029/2019GL083826>
- Otosaka I.N., Shepherd A., Ivins E.R., Schlegel N.-J., Amory C., van den Broeke M.R.* Mass balance of the Greenland and Antarctic ice sheets from 1992 to 2020. *Earth System Science Data*. 2023, 15 (4): 1597–1616.
<https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>
- Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B.* MEASUREs In-SAR-Based Antarctica Ice Velocity Map, Version 2. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2017. Retrieved from: URL:
<https://doi.org/10.5067/D7GK8F5J8M8R> (Last access: August 26, 2025).
- Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I.* Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica. *Cryosphere*. 2021, 15: 2667–2682.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-2667-2021>
- Surge in Antarctica's melting. National Snow and Ice Data Center. Retrieved from: URL:
<https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/surge-antarcticas-melting-new-year-arrives> (Last access: August 29, 2025).
- The Great Un-Freezing: Record Antarctic surface melt extent set; Peninsula melting slows. National Snow and Ice Data Center. Retrieved from: URL:
<https://nsidc.org/ice-sheets-today/analyses/great-un-freezing-record-antarctic-surface-melt-extent-set-peninsula-melting-slows> (Last access: August 29, 2025).
- Wallis B.J., Hogg A.E., van Wessem J.M., Davison B.J., van den Broeke M.R.* Widespread seasonal speed-up of west Antarctic Peninsula glaciers from 2014 to 2021. *National Geoscience*. 2023, 16: 231–237.
<https://doi.org/10.1038/s41561-023-01131-4>
- Zeng Z., Wang Z., Ding M., Zhang B.* Estimation and long-term trend analysis of surface solar radiation in Antarctica: a case study of Zhongshan Station. *Adv. Atmosphere Science*. 2021, 38: 1497–1509.
http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf