

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКОВ ЗАЛИВА ГРЁНФЬОРД (АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)

© 2024 г. А. В. Терехов^{1*}, У. В. Прохорова¹, В. Э. Демидов¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: antonvtterekhov@gmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Ключевые слова: коротковолновая радиация, баланс массы ледника, тепловой баланс, Шпицберген, Арктика

Рассмотрена зависимость пространственного распределения величины абляции льда на ледниках Вёринг и Альдегонда (Западный Шпицберген) от приходящего потока солнечной радиации. Показано, что около трети пространственной изменчивости таяния льда на поверхности ледника Альдегонда и 21% для ледника Вёринг могут быть объяснены исключительно особенностями инсоляции. Максимальные различия, вызванные неравномерной освещённостью рассматриваемых ледников, эквивалентны разности в 45–60 м высоты.

DOI: 10.31857/S2076673424010039

ВВЕДЕНИЕ

Для большинства горно-долинных ледников мира характерна устойчивая связь баланса их массы с высотой (Fountain, Vecchia, 1999). Физически этот факт объясняется существованием вертикальных градиентов основных метеорологических величин, влияющих на баланс массы — температуры воздуха, осадков и радиационного баланса поверхности. Наличие подобной связи было показано для ледников всех климатических поясов, от экватора (Mölg et al., 2009) до полярных областей (Oerlemans, Hoogendoorn, 1989). Для ледников Шпицбергена зависимость абляции льда от высоты была подтверждена результатами первых непрерывных масс-балансовых наблюдений, проводившихся со второй половины 60-х годов прошлого века (Кренке, Ходаков, 1966; Hagen, Liestøl, 1990). Это свойство баланса массы используется на практике, во-первых, для расчётов среднего по леднику таяния на основе измерений абляционных реек (Elagina et al., 2021; Terkhov et al., 2022), а во-вторых, для моделирования величины стаявшего слоя льда на основе температуры воздуха на тех ледниках, где непосредственные измерения не проводятся (Ромашова и др., 2019; Чернов и др., 2019).

Несмотря на то что связь между балансом массы и высотой над уровнем моря неоспорима, она не объясняет всей пространственной изменчивости

абляции льда, осложняемой особенностями топографии и микроклимата (Paterson, 1994). Эти факторы, включающие ветровое и лавинное перераспределение твёрдых осадков, локальные эффекты затенения рельефом, а также неравномерность альбедо поверхности, в общем случае от высоты не зависят (Fountain, Vecchia, 1999). Оценить их влияние на пространственную изменчивость таяния не просто, поскольку современные мониторинговые сети на ледниках зачастую организованы таким образом, что абляционные рейки устанавливаются в первую очередь для измерения высотных особенностей балансовых величин.

В статье (Сидорова и др., 2019) выдвинута гипотеза о том, что различия в таянии ледников залива Грёнфьорд (о. Западный Шпицберген) в конкретные годы могут определяться локальными факторами, определяющими инсоляцию поверхности ледников. Подобное предположение вполне обоснованно с учётом того, что коротковолновая радиация преобладает в приходной части теплового баланса ледников Шпицбергена, расположенных ниже современной снеговой линии (Arnold, 2006; Zou et al., 2021; Prokhorova et al., 2023).

Влияние инсоляции на пространственную картину таяния поверхности было установлено ранее в ряде работ для ледников как умеренных, так и высоких широт. В частности, в работе (Vincent,

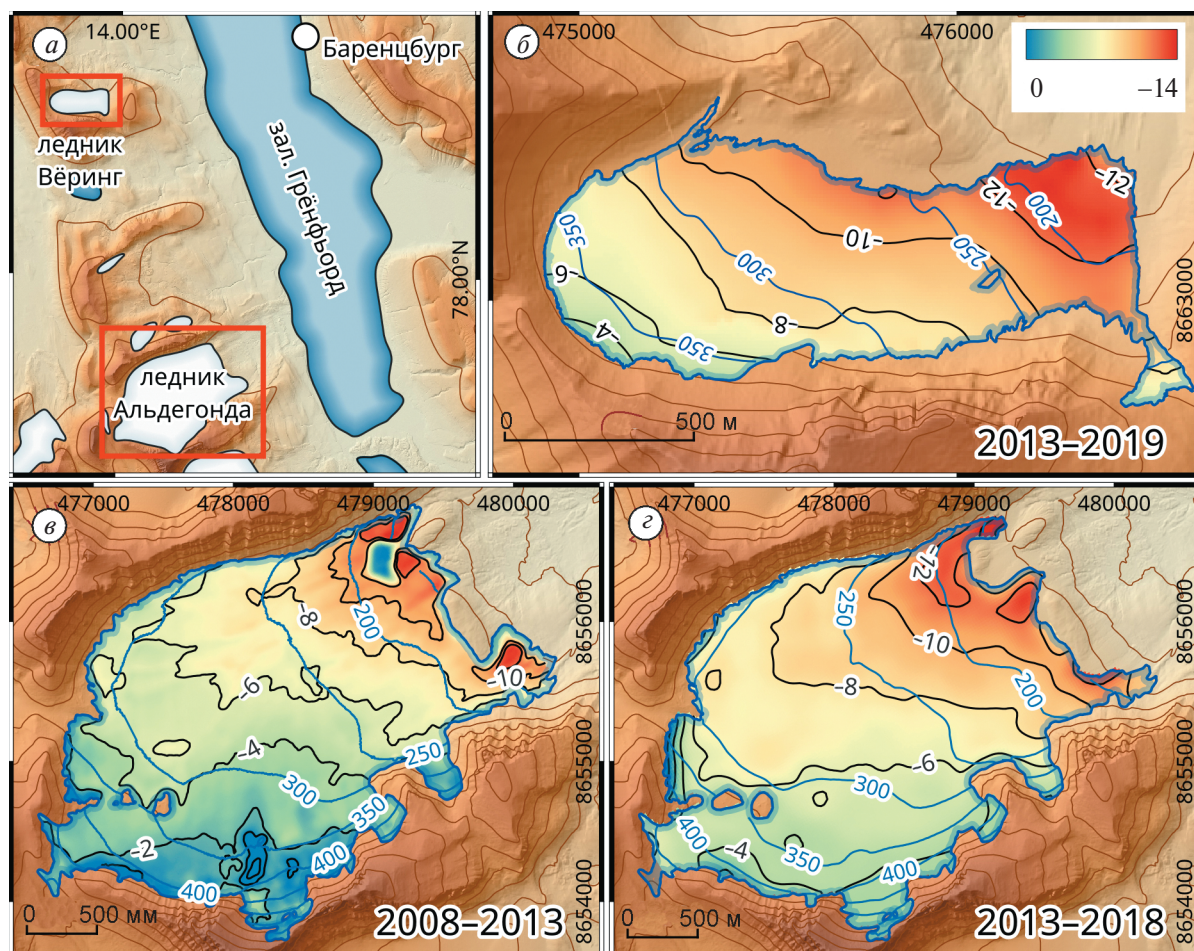


Рис. 1. Расположение ледников Вёринг и Альдегонда (а), а также снижение их поверхности — ледник Вёринг в 2013–2019 гг. (б); ледник Альдегонда в 2008–2013 гг. (в); ледник Альдегонда в 2013–2018 гг. (г).

Fig. 1. The location of Voringbreen and Aldegondabreen glaciers (a), and the lowering of their surface — Voringbreen in 2013–2019 (b), Aldegondabreen in 2008–2013 (c), Aldegondabreen in 2013–2018 (d).

Six, 2013), где рассмотрены результаты семи лет мониторинга на леднике Сен Сорлен во Французских Альпах, было показано, что распределение величины годового баланса массы на поверхности тесно коррелирует с величиной приходящего потока солнечной радиации при ясном небе (англ. potential solar radiation). Авторы работы (Olson, Rupper, 2019) при помощи моделирования той же физической величины исследовали эффекты затенения ледников бортами долин в высокогорных регионах Центральной Азии и пришли к выводу, что различия в таянии соседних ледников в значительной степени определяются этим механизмом. Для ледников Заполярья подобная связь была продемонстрирована в работе (Носк, 1999) на примере ледника Storglaciären в Швеции. Простая эмпирическая модель таяния в зависимости от градусо-дней тепла была дополнена расчётом величины потока солнечной радиации при ясном небе. Показано, что полученная модель лучше отражает

пространственные особенности таяния льда, а также с большей точностью воспроизводит среднесуточные величины абляции.

Для ледников залива Грёнфьорд конкретных примеров, иллюстрирующих зависимость пространственного распределения абляции от условий инсоляции, до сих пор продемонстрировано не было. Объектами для исследования этой зависимости могут быть ледники, лежащие в глубоких широтно расположенных горных долинах таким образом, что затенение бортов и различия в экспозиции создают выраженный контраст в динамике абляции различных участков поверхности ледников. В районе залива Грёнфьорд такими объектами являются ледники Вёринг и Альдегонда (рис. 1).

Цель исследования заключается в оценке различий в инсоляции на поверхности ледников Вёринг и Альдегонда и влияния этих различий на пространственное распределение абляции льда. В исследовании использованы результаты применения

геодезического метода для определения баланса массы ледников залива Грэнфьорд, приведённые в статьях (Терехов и др., 2020а; Terekhov et al., 2023). Метод даёт гораздо более детальную пространственную картину таяния, нежели используемые для ежегодного мониторинга абляционные рейки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ледники Вёринг и Альдегонда расположены в западной части Земли Норденшельда (остров Западный Шпицберген) на западном берегу залива Грэнфьорд, соответственно в 6 и 10 км к западу и юго-западу от посёлка Баренцбург (см. рис. 1). Меньший из рассматриваемых ледников, карово-долинный ледник Вёринг, вытянут с запада на восток примерно на 1.5 км, имеет ширину около 700 м и спускается с высоты 400 до 180 м над ур. моря, занимая площадь 0.76 км² (по состоянию на 2019 г.) (Терехов и др., 2020а). Горно-долинный ледник Альдегонда имеет большую площадь — около 5.5 км² (2021 г.). По результатам последней топографической съёмки 2018 г. ледник спускается до высоты 130 м над ур. моря (Терехов и др., 2020).

Практически вся поверхность этих ледников находится на отметках ниже 500 м над ур. моря, т.е. ниже современной снеговой линии на архипелаге (Noël et al., 2020), в результате чего в последние десятилетия для них характерен отрицательный годовой баланс массы (Прохорова и др., 2023).

Из опубликованных работ нам доступны результаты определения баланса массы геодезическим методом: для ледника Вёринг за один интервал времени, с 2013 по 2019 г. (Терехов и др., 2020а), для ледника Альдегонда — за два пятилетних интервала, 2008–2013 и 2013–2018 гг. (Terekhov et al., 2023). Эти результаты получены вычитанием разновременных цифровых моделей рельефа (далее — ЦМР) после предварительного устранения систематического вертикального сдвига между ними. Исходными данными для расчётов были ЦМР Норвежского полярного института S0 Terrengmodell (2008 г.), фрагменты ЦМР ArcticDEM на 2013 г. (Porter et al., 2018), а также материалы наземных топографических съёмок ААНИИ за 2018–2019 гг. Для дальнейшего анализа все материалы приведены к единому пространственному разрешению в 20 м.

Также авторами использован рельеф поверхности ледника Альдегонда из работы (Василенко и др., 1999). Показанные в статье изолинии поверхности были векторизованы и проинтерполированы сплайном в ЦМР. Поскольку исходный рисунок не включает в себя высоты стабильной во времени неледниковой поверхности, устранить систематический вертикальный сдвиг итогового раstra относительно трёх упомянутых выше ЦМР невозможно. Поэтому рельеф ледника Альдегонда на 1999 г.

используется лишь для качественных, но не количественных оценок.

Отметим, что рассчитанное по ЦМР снижение поверхности ледника в общем случае может не совпадать с абляцией поверхности в той же точке. К изменению высоты поверхности ледников могут приводить и другие процессы, наиболее важным из которых является движение ледника (Vincent et al., 2021). Однако в исследовании (Terekhov et al., 2023) показано, что скорости движения ледника Альдегонда не превышают 2 м в год, при этом преобладающая доля поверхности движется с гораздо меньшими скоростями, ниже погрешности измерений (15 см год⁻¹). Для ледника Вёринг прямых измерений скоростей льда не проводилось, но оснований полагать, что его скорости превышают наблюдаемые на леднике Альдегонда, нет. Следовательно, в рассматриваемом случае фактором движения ледника можно пренебречь, приняв снижение поверхности полностью тождественным поверхностному таянию.

Для проверки гипотезы о неравномерном распределении величины инсоляции был рассчитан поток приходящей коротковолновой радиации при ясном небе на основе алгоритма Potential Incoming Solar Radiation из ГИС с открытым исходным кодом SAGA GIS. Алгоритмом учитывается как астрономический фактор, т.е. суточное и годовое движение Солнца, так и морфометрический — экспозиция и уклон поверхности, а также затенение окружающими формами рельефа (Boehner, Antonic, 2009). Переотражение солнечной радиации при расчётах не учитывается, поскольку моделирование этого процесса требует знания альбедо поверхности, представляющего дополнительный источник погрешности.

Расчёты потока радиации выполнялись для обоих ледников на основе ЦМР ArcticDEM за период времени с 15 июля по 15 сентября, условно принятый нами за сезон абляции льда в исследуемом районе: исчезновение снежного покрова и отступление снеговой линии вверх по ледникам начинается в первую декаду июля, а в середине сентября температура воздуха становится отрицательной и абляция на поверхности ледников прекращается (Terekhov et al., 2022; Прохорова и др., 2023). Полученная в результате моделирования величина носит характер “оценки сверху”, и её погрешность не оценивается. Дальнейшие расчёты на основе этой величины являются приближительными.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственная изменчивость абляции льда и инсоляции. На рис. 1, в–г видно, что снижение поверхности ледников Вёринг и Альдегонда ожидаемо зависит от высоты, демонстрируя наибольшие по модулю значения (т.е. максимальные скорости

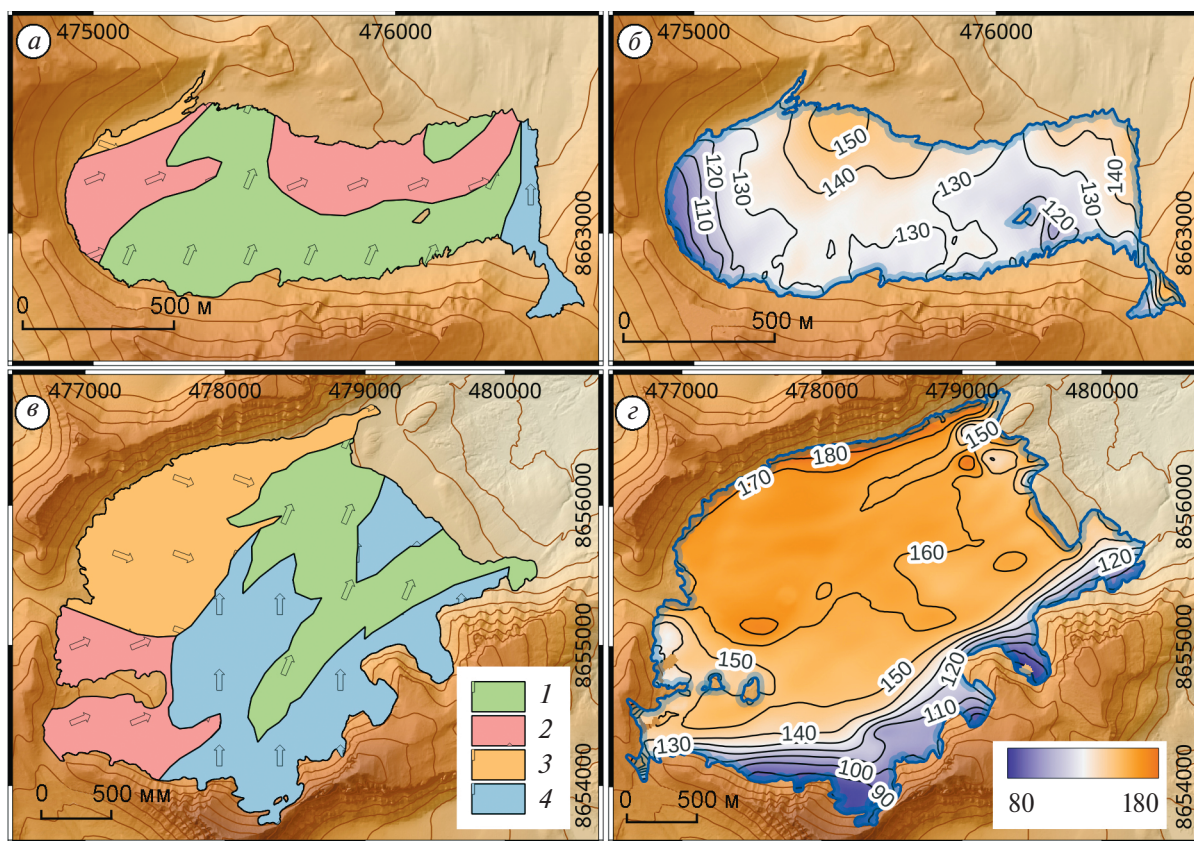


Рис. 2. Экспозиция поверхности (а; в): 1 — север-северо-восток, 2 — восток-северо-восток, 3 — восток-юго-восток, 4 — север; средний поток нисходящей солнечной радиации при ясном небе (15 июля — 15 сентября) на поверхности ледников (б; г): Вёринг (а; б) и Альдегонда (в; г).

Fig. 2. Surface aspect (a; в): 1 — north-north-east, 2 — east-north-east, 3 — east-south-east, 4 — north; averaged potential incoming solar radiation flux (15 July–15 September) on the glaciers (б; г): Vöringbreen (a; б) and Aldegondabreen (в; г).

абляции) вблизи края ледника, а наименьшие значения — в верховьях. Тем не менее из различий в контурах изогипис и изолиний снижения поверхности на леднике Альдегонда видно, что скорости абляции различаются вдоль левого и правого бортов (северного и южного соответственно) при равных высотах. Таяние идёт медленнее вдоль затённого скальной грядой южного борта ледника. Схожая картина наблюдается также на леднике Вёринг.

На рис. 2 показаны результаты расчётов среднего значения плотности потока приходящей солнечной радиации при ясном небе на поверхности ледников Вёринг и Альдегонда за период с 15 июля по 15 сентября. Показанные на рисунке значения инсоляции носят приближённый характер, поскольку могут меняться в зависимости от выбранных параметров прозрачности атмосферы и солнечной постоянной. Для дальнейшего анализа используются разности величины плотности потока в пределах более и менее освещённых частей рассматриваемых ледников.

Для ледника Альдегонда расчётные значения потенциального потока приходящей солнечной радиации при ясном небе в целом выше, чем для ледника Вёринг, и имеют диапазон около 100 Вт/м^2 , от 85 до 185 Вт/м^2 (см. рис. 2). Максимум инсоляции приходится на северную часть ледника, в то время как минимальные значения распределены вдоль южного борта. Осреднённый расчётный поток в пределах этих частей равняется 165 и 139 Вт/м^2 соответственно, т.е. различие в средней инсоляции составляет около 26 Вт/м^2 . Объяснением таких различий между северной и южной частями ледника Альдегонда служит форма его поверхности. Из-за её вогнутости, с тальвегом, проходящим по продольной оси ледника, левый борт площадью около трети от всей поверхности имеет экспозицию, близкую к южной (см. рис. 2), притом что ледник в целом вытянут с юго-запада на юго-восток. Кроме того, на правую сторону ледника приходится затенение от южного борта долины.

Для ледника Вёринг характерны более низкие значения инсоляции из-за затенения стенками кара. При этом, несмотря на сравнительную

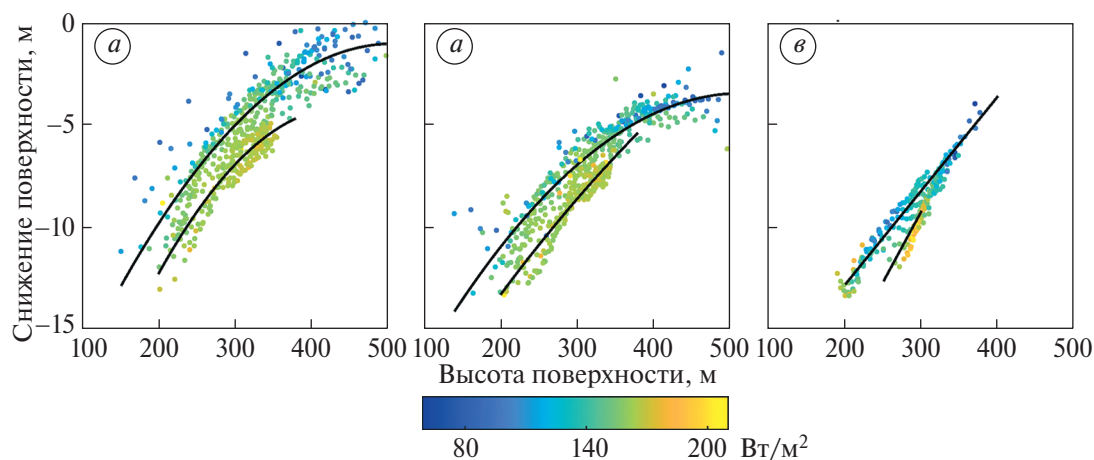


Рис. 3. Зависимость снижения поверхности ледников от высоты над уровнем моря и приходящего потока солнечной радиации при ясном небе (ледник Альдегонда, 2008–2013 гг. (а), ледник Альдегонда, 2013–2018 гг. (б), ледник Вёринг, 2013–2019 гг. (в)).

Fig. 3. Relationship between the surface lowering, the altitude above sea level and the total potential incoming solar radiation flux (Aldegondabreen, 2008–2013 (a), Aldegondabreen, 2013–2018 (б), Vøringbreen, 2013–2019 (в)).

однородность экспозиции поверхности, пространственная картина приходящего потока солнечной радиации довольно сложна, что в первую очередь обусловлено особенностями окружающего рельефа. Наибольшей освещённостью характеризуются нижние высотные зоны ледника, а также области к северо-западу от центральной части, разделённые более затённым участком поверхности (см. рис. 2). Условной границей между более и менее освещёнными частями ледника можно считать изолинию 130 Вт/м^2 . При этом размах расчётных значений инсоляции вдоль изогипсы 250 м в центральной части ледника составляет 20 Вт м^{-2} (от 116 до 136 Вт м^{-2}).

Представленные значения приходящего потока коротковолновой радиации превышают фактические, поскольку были рассчитаны для условий максимальной прозрачности атмосферы (0.7) и ясного неба. В действительности, из-за рассеяния значительной части потока солнечной радиации, вызванного облачностью, атмосферными газами и аэрозолями, контраст между фактическими значениями потока на разных участках поверхности ледников должен быть ниже расчётного. Тем не менее в работе (Носк, 1999) было продемонстрировано, что использование в модели таяния арктического ледника реально измеренного коротковолнового потока не улучшает результаты по сравнению с расчётами на основе “потенциального” потока, т.е. смоделированного для условий ясного неба. Поэтому можно ожидать, что расчётная величина хорошо описывает пространственную неравномерность инсоляции на поверхности ледников.

Количественная оценка влияния неравномерности инсоляции на таяние. Чтобы количественно

охарактеризовать влияние морфометрического фактора — сочетания экспозиции поверхности и её уклона, а также затенения горным обрамлением — на абляцию поверхности ледников Вёринг и Альдегонда, рассмотрены графики зависимости таяния от высоты над ур. моря в совокупности с третьей величиной — рассчитанным приходящим потоком солнечной радиации при ясном небе (рис. 3).

На рис. 3 видно, что точки на поверхности более или менее освещённых частей ледников образуют на графиках группы, значительно различающиеся по величине абляции и формирующие разные осреднённые зависимости таяния от высоты над уровнем моря. Эти высотные зависимости соответствуют различиям в инсоляции: более освещённые области ледников действительно характеризуются более значительным таянием, и наоборот. Проверка различий выборок на предмет средних значений абляции и инсоляции на основе t -критерия Стьюдента показывает, что статистически значимое различие присутствует для обеих величин при уровне значимости

$$\alpha = 0.05.$$

Отмечено, что погрешность расчётов абляции, выполненных геодезическим методом, не может объяснять наблюдаемые различия в таянии более или менее освещённых частей рассматриваемых ледников. Для ледника Альдегонда погрешность оценки среднего баланса массы ледника была оценена примерно в 7% за оба временных периода: $-4.49 \pm 0.32 \text{ м в.э.}$ за 2008–2013 гг. и $-6.16 \pm 0.44 \text{ м в.э.}$ за 2013–2018 гг. (Terekhov et al., 2023), для ледника Вёринг — в 6% ($-7.80 \pm 0.42 \text{ м в.э.}$) (Терехов и др., 2020а). Однако указанные значения

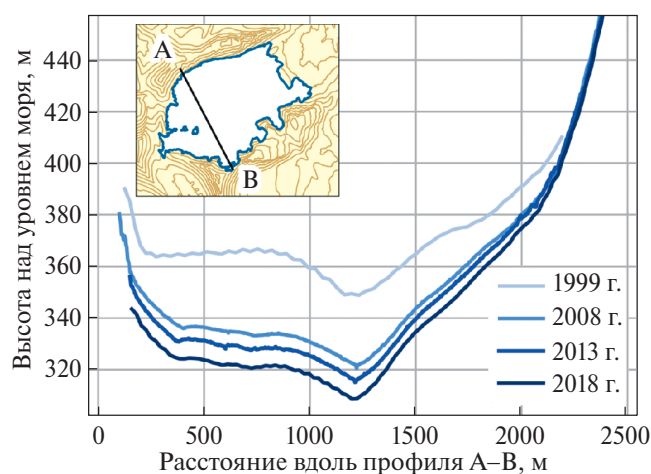


Рис. 4. Изменения поперечного профиля поверхности ледника Альдегонда в 1999–2018 гг.

Fig. 4. Changes of cross direction profile of the Aldegondabreen Glacier in 1999–2018.

включают также погрешность плотности льда ($\pm 50 \text{ кг м}^{-3}$), используемую для перевода толщины слоя абляции в единицы водного эквивалента. Следовательно, снижение поверхности ледников, измеряемое в единицах слоя льда, будет иметь существенно меньшую погрешность.

Точность результатов геодезического метода можно проиллюстрировать сравнением с величинами по данным абляционных реек на леднике Альдегонда, где проводится ежегодный масс-балансовый мониторинг. В работе (Terekhov и др., 2023) показано, что кумулятивный гляциологический и геодезический баланс массы соответственно хорошо совпадают за рассматриваемые пятилетние периоды, составляя: $-4.42 \pm 0.8 \text{ м в.э.}$ и $-4.49 \pm 0.32 \text{ м в.э.}$ (2008–2013 гг.); $-6.30 \pm 0.49 \text{ м в.э.}$ и $-6.16 \pm 0.44 \text{ м в.э.}$ (2013–2018 гг.). Для ледника Вёринг подобное сравнение невозможно, поскольку измерения абляционных реек на нём не проводятся. Однако расчёт баланса массы геодезическим методом проводился для этого ледника на основе схожих исходных данных, наземной спутниковой топосъёмки и ЦМР ArcticDEM.

Кроме того, на примере ледника Альдегонда видно, что показанные различия в абляции носят систематический характер, проявляясь в разные временные периоды. Съёмку рельефа ледника Альдегонда проводили и ранее, в 1999 г. На поперечном профиле (рис. 4) видно, что в начале столетия контраст между высотой и наклоном поверхности левого и правого бортов ледника был заметен ниже. В последующие два десятилетия потери льда левой, более освещённой части оказались значительно выше (при равной высоте), что привело к существенному понижению этой области. Таким образом, влияние инсоляции на

таяние льда прослеживается как минимум до начала XXI века.

Для частей ледников, соответствующих более и менее освещённым их областям, методом наименьших квадратов были проведены линии тренда, показывающие осреднённые зависимости абляции от высоты над ур. моря. Для ледника Альдегонда разница в пятилетней величине слоя абляции, рассчитанная как разность между линиями трендов, примерно равна в оба временных периода (2008–2013 и 2013–2018 гг.) и составляет 2.1 м. Эта величина равна 40 и 30% от суммарных за пятилетние периоды значений снижения поверхности. Линии трендов абляции льда в пределах северной и южной частей (см. рис. 3) практически параллельны друг другу, т.е. выявленное различие не зависит от высоты. Если разделить полученное суммарное значение на пять балансовых лет, получится различие в таянии в 0.40 м льда в год, или, если принять плотность льда равной 0.88 кг м^{-3} (Чернов и др., 2019), в 0.36 м в.э. в год.

Для ледника Вёринг на графике также видны две основные линии тренда высотной зависимости с некоторым количеством точек между ними. Тем не менее этот ледник делится на освещённую и затенённую части менее очевидным образом, нежели ледник Альдегонда, поскольку его поверхность гораздо более однородна с точки зрения экспозиции. Количественно оценить влияние неравномерности инсоляции на таяние нагляднее всего на высоте 250 м над ур. моря, где оно имеет наиболее сильный размах на графике (см. рис. 3). Снижение поверхности на этой высоте имеет диапазон в 2.2 м льда (от 7.7 до 9.9 м льда), или 1.85 м в.э. за весь рассматриваемый период, составляя 25% от суммарной за шестилетний период величины снижения поверхности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наглядным образом охарактеризовать влияние условий инсоляции на абляцию поверхности можно путём сравнения с высотным градиентом таяния (табл. 1). По линиям тренда (см. рис. 3) максимальные различия в абляции для разных по освещённости частей ледников составляют 2.1 м льда за пять сезонов для ледника Альдегонда и 2.2 м льда за шесть сезонов для ледника Вёринг. Это соответствует различиям в слое абляции в $0.36 \text{ м в.э. год}^{-1}$ (Альдегонда) и $0.32 \text{ м в.э. год}^{-1}$ (Вёринг). Вместе с тем высотный градиент таяния (см. рис. 3) составляет: для ледника Альдегонда — 4.0–4.6 м льда на 100 м высоты за пять лет (на высоте 275 м над ур. моря, пик высотного распределения ледника), или $0.70\text{--}0.81 \text{ м в.э. } 100 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$; для ледника Вёринг — 4.1 м льда на 100 м высоты за пять лет, или $0.53 \text{ м в.э. } 100 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Таким образом, различия, вызванные неравномерной освещённостью поверхности рассматриваемых

Таблица 1. Различия в толщине слоя абляции льда, вызванные неравномерностью инсоляции и высотным градиентом таяния на ледниках Альдегонда и Вёринг

Table 1. Differences of the ice melt layer induced by unequal insolation and by vertical lapse, for Aldegondabreen and Vøringbreen glaciers

Ледник	Период, годы	Различие в абляции льда для областей с более и менее высокой инсоляцией	Высотный градиент абляции льда		Разница в высоте поверхности ледника, которой эквивалентны различия инсоляции	
		м льда за период	м в.э. год ⁻¹	м льда 100 м ⁻¹ за период	м в.э. 100 м ⁻¹ год ⁻¹	м высоты
Альдегонда	2008–2013	2.1	0.36	4.0	0.70	50
Альдегонда	2013–2018	2.1	0.36	4.6	0.81	45
Вёринг	2013–2019	2.2	0.32	4.1	0.53	60

ледников, эквивалентны разности в 45–60 м высоты (см. табл. 1), что немало по отношению к небольшому высотному диапазону ледников в этой части Шпицбергена (Чернов, Муравьев, 2018).

Таким образом, слой абляции льда за один и тот же сезон должен отличаться на поверхности соседних ледников даже при равной температуре воздуха и её высотном градиенте. Это позволяет предположить, что разница в сезонном таянии ледников в окрестностях Баренцбурга достигает максимума в те годы, когда поток фактической солнечной радиации максимален, и наоборот, при небольшом потоке радиации эти различия сглаживаются. Пример подобного отличия в таянии рассмотрен в статье (Сидорова и др., 2019), где показано, что толщина стаявшего за сезон слоя льда на равных высотах над ур. моря имеет

существенную разницу для трёх ледников: Альдегонда, Западный и Восточный Грёнфьорд. Проверка этой гипотезы не проста, поскольку из-за неоднородности облачного покрова над изучаемой территорией простая экстраполяция актинометрических измерений в одной точке на весь район будет неточна. Следовательно, подобная проверка требует синхронных мониторинговых измерений солнечной радиации на всех изучаемых ледниках.

При анализе зависимости таяния льда от величины приходящей солнечной радиации по отдельным диапазонам высот (рис. 5) оказывается, что в каждом из пятидесятиметровых интервалов наблюдается статистически значимый тренд ($\alpha = 0.05$). Точки на графиках прорежены для наглядности, однако все расчёты производились на

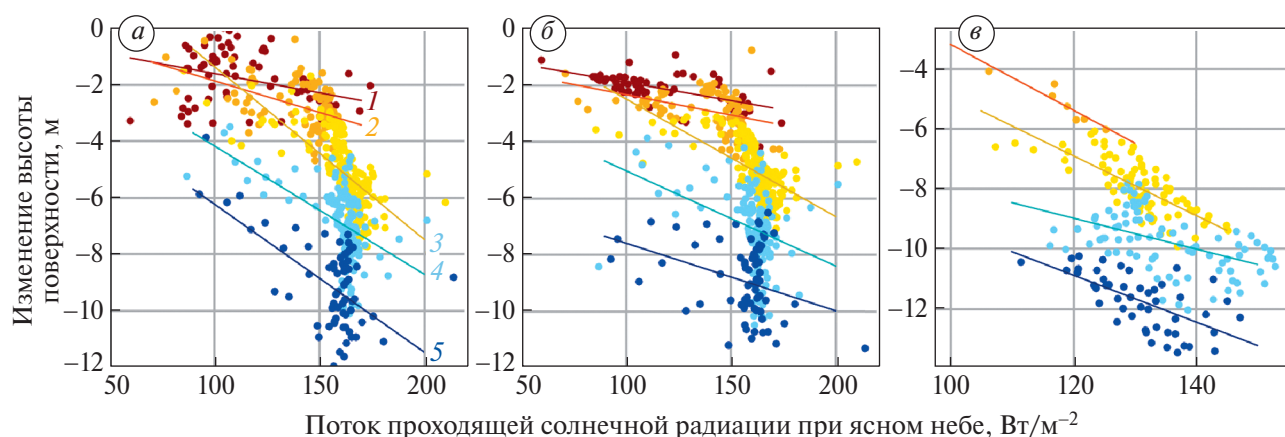


Рис. 5. Зависимость изменения высоты поверхности ледников от приходящего потока солнечной радиации при ясном небе, по высотным интервалам: 1 — 400–450 м, 2 — 350–400 м, 3 — 300–350 м, 4 — 250–300 м (ледник Альдегонда, 2008–2013 гг. (а), ледник Альдегонда, 2013–2018 гг. (б), ледник Вёринг, 2013–2019 гг. (в)).

Fig. 5. Relationship between the surface lowering and the total potential incoming solar radiation, by elevation bins: 1 — 400–450 m, 2 — 350–400 m, 3 — 300–350 m, 4 — 250–300 m (Aldegondabreen Glacier, 2008–2013 (a), Aldegondabreen Glacier, 2013–2018 (b), Vøringbreen Glacier, 2013–2019 (c)).

Таблица 2. Зависимость изменения высоты поверхности ледников от приходящего потока солнечной радиации при ясном небе для ледников Альдегонда и Вёринг по высотным интервалам

Table 2. Relationship between surface lowering and total potential incoming solar radiation, for the Aldegondabreen and Vøringbreen glaciers, by elevation bins

Интервал высот, м над ур. моря	Ледник Альдегонда							
	2008–2013 гг.				2013–2018 гг.			
	Коэффициент корреляции Пирсона	Среднее квадратическое отклонение абляции, м льда	Размер выборки, пикс	Коэффициент корреляции Пирсона	Среднее квадратическое отклонение абляции, м льда	Размер выборки, пикс	Коэффициент корреляции Пирсона	Среднее квадратическое отклонение абляции, м льда
200–250	–0.59	1.65	1680	–0.62	1.36	1680	–0.64	0.93
250–300	–0.52	1.31	3024	–0.40	1.43	3024	–0.50	0.97
300–350	–0.67	1.25	5016	–0.61	0.94	5016	–0.75	0.91
350–400	–0.47	0.97	1968	–0.36	0.73	1968	–0.92	0.71
400–450	–0.37	1.00	1728	–0.33	0.56	1728	–	–

основе исходных выборок, сформированных из растров с размером ячейки 20 м. Коэффициенты корреляции между таянием и инсоляцией изменяются от –0.33 до –0.62 на леднике Альдегонда и от –0.50 до –0.92 на леднике Вёринг (табл. 2).

Оценим влияние условий инсоляции на пространственную изменчивость таяния в масштабах ледника в целом. Долю дисперсии изучаемого признака — абляции льда на поверхности, объясняемую выбранными предикторами, — можно вычислить как значение статистической величины R^2 . Для сравнения, оценка зависимости абляции от высоты над уровнем моря для ледника Альдегонда довольно высока: значение R^2 составляет 0.70 и 0.74 для периодов 2008–2013 и 2013–2018 гг. соответственно. Однако одной только неравномерностью инсоляции можно объяснить примерно треть в дисперсии величин таяния на поверхности ледника Альдегонда ($R^2 = 0.34$ и 0.29). Для ледника Вёринг значение R^2 для зависимости от высоты над ур. моря составляет 0.70 (2013–2019 гг.) и всего 0.21 — для зависимости от инсоляции. Однако во всех случаях тренд зависимости абляции от инсоляции оказывается статистически значимым ($\alpha = 0.05$). Объём выборки для расчётов составляет примерно 13 тысяч точек для ледника Альдегонда и 1450 точек для ледника Вёринг.

Оставшаяся необъяснённой часть дисперсии абляции — проявление вклада прочих факторов, влияющих на тепловой баланс ледника, но при этом не зависящих от высоты (например, альbedo поверхности), а также вклад случайных ошибок измерений и интерполяции. Неверно было бы утверждать, что такая же доля изменчивости абляции определяется солнечной радиацией для всех ледников в окрестностях Баренцбурга. Напротив, можно ожидать, что для более однородных с точки зрения инсоляции (то есть крутизны, экспозиции и затённости поверхности) ледников этот показатель должен быть меньшим, и наоборот.

Как было показано выше на примере ледников Вёринг и Альдегонда, величина приходящего потока солнечной радиации при ясном небе хорошо отражает пространственные особенности абляции льда, и, кроме того, довольно проста для расчёта, поскольку требует в качестве исходных данных только ЦМР. Поэтому сравнение абляции соседних ледников Шпицбергена гораздо информативнее проводить на основе именно этого показателя, а не по одному лишь направлению продольной оси ледника, как это делалось в предыдущих работах (Чернов и др., 2018). Такой подход может давать неоднозначные результаты, причисляя, например, ледник Альдегонда к ледникам северо-восточной экспозиции, хотя в действительности он не является таковым (см. рис. 2). Подобная ориентация характерна всего для трети ледника; ещё треть, напротив, имеет

экспозицию, близкую к южной, обеспечивая вместе с отсутствием затенённости повышенное таяние (в среднем выше на $0.36 \text{ м в.э. год}^{-1}$).

Полученный результат затрагивает тему репрезентативности мониторинговых сетей абляционных реек на ледниках Шпицбергена. К примеру, на нескольких ледниках архипелага абляционные рейки установлены одним продольным “высотным” профилем вдоль оси ледника (Aas et al., 2016; Terekhov et al., 2022). Вопрос о том, насколько такое расположение реек репрезентативно с точки зрения условий инсоляции на поверхности ледника, никогда не рассматривался для мониторинговых программ архипелага Шпицберген. На леднике Альдегонда абляционные рейки распределены более равномерно по поверхности, но их количество на относительно освещённых частях никак не пропорционально площадям этих частей. Всё это служит очевидным источником систематической ошибки при расчётах среднего по леднику значения баланса массы, а, как показывают результаты нашего исследования, погрешность относительно среднего значения может составлять первые дециметры в год. Следовательно, для контроля результатов мониторинга необходимы периодическое повторение топосъёмки (к примеру, раз в пять лет) и расчёт баланса массы геодезическим методом.

ВЫВОДЫ

Одно из важных следствий проведённого анализа заключается том, что ориентация ледников архипелага Шпицберген, а также орография скального обрамления их долин существенно влияют на тепловой баланс и поверхностную абляцию. Фактически измеренная абляция льда на поверхностях ледников Вёринг и Альдегонда различается в наиболее и наименее освещённых частях в среднем на 0.32 и $0.36 \text{ м в.э. за сезон}$, что эквивалентно разнице высот в $45\text{--}60 \text{ м}$.

Ведущим фактором в распределении величины таяния по поверхности ледников является высота над ур. моря, что с физической точки зрения было обосновано ранее (Ohmura, 2001). Однако зависимость от высоты осложняется вариациями приходящего потока коротковолновой радиации: треть дисперсии абляции льда на поверхности ледников Альдегонда и 20% на леднике Вёринг могут объясняться одной лишь неравномерностью инсоляции. Показано, что пространственная картина этой неравномерности сложна и не может быть оценена на основе исключительно экспозиции ледника, поскольку в значительной мере определяется также уклоном поверхности и скальным обрамлением. Поэтому анализ “экспозиции” на основе одного лишь направления продольной оси ледника гораздо информативнее

заменить расчётом приходящего потока солнечной радиации при ясном небе. При анализе абляции по отдельным 50-метровым высотным диапазонам показано, что коэффициенты корреляции между таянием льда и инсоляцией изменяются от -0.33 до -0.62 на леднике Альдегонда и от -0.50 до -0.92 на леднике Вёринг.

Экстраполировать полученные в исследовании выводы и заключить, что аналогичная доля изменчивости абляции определяется солнечной радиацией для всех ледников в окрестностях Баренцбурга, было бы неверно. Напротив, можно ожидать, что для более однородных с точки зрения освещённости (т.е. крутизны, экспозиции и затенения поверхности) ледников этот показатель должен быть меньшим, и наоборот. Можно предположить, что разница в сезонном таянии ледников в окрестностях Баренцбурга достигает максимума в те годы, когда поток фактической солнечной радиации максимален, и наоборот, при небольшом потоке радиации эти различия сглаживаются.

Ни один из выбранных ледников не имеет поверхностей южной экспозиции. Лишь треть поверхности ледника Альдегонда имеет ориентацию, близкую к южной. Несмотря на это, из предыдущих работ известно, что в тепловом балансе ледника Альдегонда в среднем за сезон абляции коротковолновый баланс поверхности является наибольшим из положительных компонентов (Prokhorova et al., 2023). При ориентации поверхности ледника на юг вклад солнечной радиации в абляцию может быть существенно выше оцененного нами для ледников Вёринг и Альдегонда.

Отмечено, что приведённые авторами оценки смогли стать возможными благодаря использованию геодезического метода расчёта баланса массы ледников. На основе мониторинговых измерений абляционных реек, установленных на леднике Альдегонда, несмотря на их количество и расположение по всей поверхности ледника, таких выводов сделать не удавалось. Это иллюстрирует ценность геодезического метода определения баланса массы ледников для изучения системы “атмосфера — ледник”: это не только парный метод мониторинга, полезный для контроля измерений по абляционным рейкам, но и ценный источник данных сам по себе.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген, организованной Арктическим и антарктическим НИИ, за предоставленное оборудование, за помощь в организации и проведении полевых работ.

Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020—2024 гг. “Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс

Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген”.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Arctic Expedition on Svalbard (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for providing logistics, equipment and for helping to carry out the field studies.

This study was funded under Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, Hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–24.

ЛИТЕРАТУРА

- Василенко Е. В., Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я., Наварро Ф. Х., Токарев М. Ю., Калашников А. Ю., Мирошниченко Д. Е., Резников Д. С. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 г. // Материалы гляциол. исследований. 1999. Вып. 90. С. 86–99.
- Кренке А. Н., Ходаков В. Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // Материалы гляциол. исследований. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
- Прохорова У. В., Терехов А. В., Демидов В. Э., Веркулич С. Р., Иванов Б. В. Внутрисезонная изменчивость абляции ледника Альдегонда (Шпицберген) // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 2. С. 62–72. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020138>
- Ромашова К. В., Чернов Р. А., Василевич И. И. Исследование ледникового стока рек в бассейне залива Грэн-фьорд (Западный Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 34–45. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-34-45>
- Сидорова О. Р., Тарасов Г. В., Веркулич С. Р., Чернов Р. А. Изменчивость поверхностной абляции горных ледников Западного Шпицбергена // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 4. С. 438–448. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-438-448>
- Терехов А. В., Демидов В. Э., Казаков Э. Э., Анисимов М. А., Веркулич С. Р. Определение баланса массы ледника Вёринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013–2019 годы // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 5. С. 55–63. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(55-63\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63))
- Терехов А. В., Тарасов Г. В., Сидорова О. Р., Демидов В. Э., Анисимов М. А., Веркулич С. Р. Оценка баланса массы ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в 2015–2018 гг. на основе модели ArcticDEM, геодезических и гляциологических данных // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 192–200. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020033>
- Чернов Р. А., Муравьев А. Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-462-472>
- Чернов Р. А., Кудиков А. В., Вишвецова Т. В., Осокин Н. И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 59–66. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-59-66>
- Aas K. S., Dunse T., Collier E., Schuler T. V., Berntsen T. K., Kohler J., Luks B. The climatic mass balance of Svalbard glaciers: a 10-year simulation with a coupled atmosphere–glacier mass balance model // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1089–1104. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1089-2016>
- Arnold N. S., Rees W. G., Hodson A. J., Kohler J. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2006. V. 111. F2.
- Böhner J., AntoniĆ O. Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology // Developments in soil science. 2009. V. 33. P. 195–226. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00008-1)
- Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B. Mass balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, estimated by glaciological, geodetic and modeling approaches // Geosciences. 2021. V. 11. № 2. 78. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020078>
- Fountain A. G., Vecchia A. How many Stakes are Required to Measure the Mass Balance of a Glacier? // Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography. 1999. V. 81. № 4. P. 563–573. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.1999.00084.x>
- Hagen J. O., Liestøl O. Long-Term Glacier Mass-Balance Investigations in Svalbard, 1950–88 // Annals of Glaciology. 1990. V. 14. P. 102–106. <https://doi.org/10.3189/S0260305500008351>
- Hock R. A distributed temperature-index ice- and snow-melt model including potential direct solar radiation // Journ. of Glaciology. 1999. 45 (149). P. 101–111. <https://doi.org/10.3189/S0022143000003087>
- Mölg T., Cullen N. J., Hardy D. R., Winkler M., Kaser G. Quantifying Climate Change in the Tropical Midtroposphere over East Africa from Glacier Shrinkage on Kilimanjaro // Journ. of Climate. 2009. 22. P. 4162–4181. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2954.1>
- Noël B., Jakobs C. L., van Pelt W. J. J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J. O., Luks B., Reijmer C. H., van de Berg W. J., van den Broeke M. R. Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability // Nature Communications. 2020. V. 11. 4597. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1>
- Oerlemans J., Hoogendoorn N. Mass-Balance Gradients and Climatic Change // Journ. of Glaciology. 1989.

- V. 35 (121). P. 399–405. <https://doi.org/10.3189/S002214300009333>
- Ohmura A. Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method // *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001. V. 40 (4). P. 753–761. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2)
- Olson M., Rupper S. Impacts of topographic shading on direct solar radiation for valley glaciers in complex topography // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 29–40. <https://doi.org/10.5194/tc-13-29-2019>
- Paterson W. S. B. *The Physics of Glaciers*. Oxford: Pergamon Press, 1994. 480 p.
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M. J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojensen M. 2018, "ArcticDEM". Harvard Dataverse. V. 1. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B., Demidov V. Heat balance of a low-elevated Svalbard glacier during the ablation season: A case study of Aldegondabreen // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2023. V. 55. № 1. 2190057. <https://doi.org/10.1080/15230430.2023.2190057>
- Terekhov A. V., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G. Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20 // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022. V. 54. № 1. P. 584–602. <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Terekhov A., Prokhorova U., Verkulich S., Demidov V., Sidorova O., Anisimov M., Romashova K. Two decades of mass-balance observations on Aldegondabreen, Spitsbergen: Interannual variability and sensitivity to climate change // *Annals of Glaciology*. 2023. P. 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.40>
- Vincent C., Cusicanqui D., Jourdain B., Laarman O., Six D., Gilbert A., Walpersdorf A., Rabatel A., Piard L., Gilbert F., Gagliardini O., Peyaud V., Arnaud L., Thibert E., Brun F., Nanni U. Geodetic point surface mass balances: A new approach to determine point surface mass balances on glaciers from remote sensing measurements // *Cryosphere*. 2021. V. 15. № 3. P. 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/TC-15-1259-2021>
- Vincent C., Six D. Relative contribution of solar radiation and temperature in enhanced temperature-index melt models from a case study at Glacier de Saint-Sorlin, France // *Annals of Glaciology*. 2013. 54 (63). P. 11–17. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A301>
- Zou X., Ding M., Sun W., Yang D., Liu W., Huai B., Jin S., Xiao C. The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014 // *Polar Research*. 2021. T. 40. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5318>

Citation: Terekhov A. V., Prokhorova U. V., Demidov V. E. Influence of spatial distribution of solar radiation on the glacier mass balance of the Grønfjorden Bay area (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 041–053. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010039

The influence of spatial variability of solar radiation on the mass balance of glaciers in the Grønfjorden Bay area (the Svalbard archipelago)

A. V. Terekhov^{a#}, U. V. Prokhorova^a, V. E. Demidov^a

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

[#]e-mail: antonvterekhov@gmail.com

Received July 17, 2023; revised October 4, 2023; accepted March 31, 2024

In this article, we investigate how the irregular insolation of two low-elevated Svalbard glaciers exerts effect on rates of their surface melting. We compare the spatial distribution of rates of the surface lowering of glaciers Vøringbreen (0.76 km²) and Aldegondabreen (5.5 km²), both are located near Barentsburg settlement in the western part of Nordenskiöld Land (the Spitsbergen Island). As an approximation of the solar radiation flux, we used the potential incoming solar radiation calculated by the ArcticDEM digital elevation model for the period July 15–September 15, which is a typical time of ice ablation in the region under consideration. Motions of both glaciers are extremely slow, which allows assuming that lowering of their surfaces are identical to the rates of surface melting. We have found that both glaciers are distinctly divided into two parts, more and less sunlit. The spatial pattern of insolation

of the Vøringbreen glacier is controlled by the shading of the walls surrounding the cirque, while the Aldegondabreen one due to its concave shape has two different areas with a more southern and more northern exposure. The lowering of the surface shows that the more and less illuminated parts differ significantly in ice ablation. The maximum differences in melting caused by the irregular insolation are 2.1 m of ice depth over five years for the Aldegondabreen Glacier (2008–2013 and 2013–2018) and 2.2 m over six years for the Vøringbreen Glacier (2013–2019), that is 40, 30 and 25% of the total values of the surface depression for the corresponding periods. Within every 50-meter altitude interval, correlation coefficients between surface ablation and insolation vary from -0.33 to -0.62 for the Aldegondabreen and from -0.50 to -0.92 for the Vøringbreen glacier. When compared with the vertical gradient of the ice melting, the variability of ablation caused by the irregular insolation correspond to a difference in altitudes of 45–50 m in vertical for the Aldegondabreen and 60 m for Vøringbreen. These values are significant taking into account the small altitudinal range of the glaciers in that part of Spitsbergen.

Keywords: short-wave radiation, glacier mass balance, energy balance, Svalbard, Arctic

REFERENCES

- Vasilenko E. V., Glazovskiy A. F., Macheret Yu. Ya., Navarro F. Kh., Tokarev M. Yu., Kalashnikov A. Yu., Miroshnichenko D. E., Reznikov D. S. Radiophysical studies of the Aldegonda glacier on Svalbard in 1999. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1999, 90: 86–99 [In Russian].
- Krenke A. N., Khodakov V. G. About the relationship between the glacier surface melt and the air temperature. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–164 [In Russian].
- Prokhorova U. V., Terekhov A. V., Demidov V. E., Verkulich S. R., Ivanov B. V. Intra-annual variability of the surface ablation of the Aldegondabreen glacier (Spitsbergen). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 2 (63): 62–72. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020138> [In Russian].
- Romashova K. V., Chernov R. A., Vasilevich I. I. Study of the glacial flow of rivers in the Grønfjord bay basin (Western Svalbard). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2019, 65 (1): 34–45. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-34-45> [In Russian].
- Sidorova O. R., Tarasov G. V., Verkulich S. R., Chernov R. A. Surface ablation variability of mountain glaciers of West Spitsbergen. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2019, 65 (4): 438–448. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-438-448> [In Russian].
- Terekhov A. V., Demidov V. E., Kazakov E. E., Anisimov M. A., Verkulich S. R. Geodetic mass balance of Voring glacier, Western Spitsbergen, in 2013–2019. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2020, XXIV (5): 55–63. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(55-63\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63)) [In Russian].
- Terekhov A. V., Tarasov G. V., Sidorova O. R., Demidov V. E., Anisimov M. A., Verkulich S. R. Estimation of mass balance of Aldegondabreen (Spitsbergen) in 2015–2018 based on ArcticDEM, geodetic and glaciological measurements. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 2 (60): 192–200. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020033> [In Russian].
- Chernov R. A., Muraviev A. Y. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjöld Land (Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 4 (58): 462–472. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-462-472> [In Russian].
- Chernov R. A., Kudikov A. V., Vshivtseva T. V., Osokin N. I. Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustre Grønfjordbreen (Spitsbergen). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 1 (59): 59–66. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-59-66> [In Russian].
- Aas K. S., Dunse T., Collier E., Schuler T. V., Bernsten T. K., Kohler J., Luks B. The climatic mass balance of Svalbard glaciers: a 10-year simulation with a coupled atmosphere–glacier mass balance model. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1089–1104. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1089-2016>
- Arnold N. S., Rees W. G., Hodson A. J., Kohler J. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier. *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2006, 111: F2.
- Böhner J., AntoniĆ O. Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. *Developments in soil science*. 2009, 33: 195–226. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00008-1)
- Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B. Mass balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, estimated by glaciological, geodetic and modeling approaches. *Geosciences*. 2021, 11 (2): 78. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020078>
- Fountain A. G., Vecchia A. How many Stakes are Required to Measure the Mass Balance of a Glacier? *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*. 1999, 81 (4): 563–573. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.1999.00084.x>
- Hagen J. O., Liestøl O. Long-Term Glacier Mass-Balance Investigations in Svalbard, 1950–88.

- Annals of Glaciology. 1990, 14: 102–106. <https://doi.org/10.3189/S0260305500008351>
- Hock R. A distributed temperature-index ice- and snow-melt model including potential direct solar radiation. *Journ. of Glaciology*. 1999, 45 (149): 101–111. <https://doi.org/10.3189/S0022143000003087>
- Mölg T., Cullen N. J., Hardy D. R., Winkler M., Kaser G. Quantifying Climate Change in the Tropical Midtroposphere over East Africa from Glacier Shrinkage on Kilimanjaro. *Journ. of Climate*. 2009, 22: 4162–4181. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2954.1>
- Noël B., Jakobs C. L., van Pelt W. J. J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J. O., Luks B., Reijmer C. H., van de Berg W. J., van den Broeke M. R. Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability. *Nature Communications*. 2020, 11: 4597. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1>
- Oerlemans J., Hoogendoorn N. Mass-Balance Gradients and Climatic Change. *Journal of Glaciology*. 1989, 35 (121): 399–405. <https://doi.org/10.3189/S0022143000009333>
- Ohmura A. Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001, 40 (4): 753–761. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2)
- Olson M., Rupper S. Impacts of topographic shading on direct solar radiation for valley glaciers in complex topography. *The Cryosphere*. 2019, 13: 29–40. <https://doi.org/10.5194/tc-13-29-2019>
- Paterson, W.S.B. *The Physics of Glaciers*. Oxford: Pergamon Press, 1994: 480 p.
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M. J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojensen M. 2018, “ArcticDEM”. Harvard Dataverse. V. 1. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B., Demidov V. Heat balance of a low-elevated Svalbard glacier during the ablation season: A case study of Aldegondabreen. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2023, 55 (1): 2190057. <https://doi.org/10.1080/15230430.2023.2190057>
- Terekhov A. V., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G. Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022, 54 (1): 584–602. <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Terekhov A., Prokhorova U., Verkulich S., Demidov V., Sidorova O., Anisimov M., Romashova K. Two decades of mass-balance observations on Aldegondabreen, Spitsbergen: Interannual variability and sensitivity to climate change. *Annals of Glaciology*. 2023: 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.40>
- Vincent C., Cusicanqui D., Jourdain B., Laarman O., Six D., Gilbert A., Walpersdorf A., Rabatel A., Piard L., Gimbert F., Gagliardini O., Peyaud V., Arnaud L., Thibert E., Brun F., Nanni U. Geodetic point surface mass balances: A new approach to determine point surface mass balances on glaciers from remote sensing measurements. *Cryosphere*. 2021. 3 (15): 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/TC-15-1259-2021>
- Vincent C., Six D. Relative contribution of solar radiation and temperature in enhanced temperature-index melt models from a case study at Glacier de Saint-Sorlin, France. *Annals of Glaciology*. 2013, 54 (63): 11–17. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A301>
- Zou X., Ding M., Sun W., Yang D., Liu W., Huai B., Jin S., Xiao C. The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014. *Polar Research*. 2021, 40.