Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-3-453-466
УДК 551.521, 551.324

Влияние особенностей инсоляции на пространственное распределение баланса массы ледниковых куполов острова Беннетта (Восточно-Сибирское море)

А.А. Фыгина[1, 2]✉, А.В. Терехов[1], Д.В. Банцев[2]

[1] *ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия*

✉*aafygina@aari.ru*

АВТ, 0000-0002-8300-6883

Аннотация. На примере острова Беннетта (Восточно-Сибирское море) рассмотрена роль коротковолновой радиации (КВР) в формировании пространственного распределения баланса массы арктических ледниковых куполов. Целью исследования являлась количественная оценка влияния неравномерности инсоляции на величину снижения поверхности ледников. Изменение высоты поверхности четырех ледниковых куполов острова Беннетта общей площадью около 56 км² за 2012–2022 гг. было рассчитано ранее по разновременным фрагментам цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM. В среднем оно составило −6,27 ± 0,12 м, что соответствует балансу массы в −5,33 ± 0,39 м в. э. Средний за типичный сезон абляции (76 безморозных суток в год, 1994–2024 гг. по данным реанализа ERA5-Land) поток приходящей КВР при ясном небе был смоделирован в SAGA GIS с учетом астрономических и морфометрических факторов. Полученное распределение значений характеризуется пространственной неоднородностью и прямыми зависимостями от экспозиции и затененности склонов. Пространственная изменчивость инсоляции при ясном небе на поверхности куполов составляет от 360 до 520 Вт/м². Для двух куполов выявлена статистически значимая прямая зависимости снижения поверхности от величины инсоляции, с линейным трендом 0,013–0,021 м дополнительного таяния на 1 Вт/м². Также для двух наиболее крупных куполов показан положительный тренд зависимости таяния от высоты поверхности, равный 1,115–1,750 м на 100 м высоты. Показано, что для меньших куполов максимальные различия в инсоляции при ясном небе (160 Вт/м²) эквивалентны действию высотного градиента в 100–200 м. Для крупнейшего купола, Толля, проследить влияние инсоляции оказалось невозможным: из-за горизонтального движения ледника понижение поверхности, рассчитанное геодезическим методом, не тождественно реальному таянию, поэтому дальнейшее изучение вопроса требует натурных измерений баланса массы гляциологическим методом.

Ключевые слова: баланс массы ледника, ледники арктической зоны, инсоляция поверхности ледника, коротковолновая радиация, острова Восточно-Сибирского моря

Для цитирования: Фыгина А.А., Терехов А.В., Банцев Д.В. Влияние особенностей инсоляции на пространственное распределение баланса массы ледниковых куполов острова Беннетта (Восточно-Сибирское море). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(3):453–466. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-3-453-466

Поступила 20.04.2026 **После переработки 07.07.2026** **Принята 13.07.2026**

© Авторы, 2026 © Authors, 2026

Influence of insolation patterns on the spatial distribution of mass balance of ice caps on Bennett Island (East Siberian Sea)

Anna A. Fygina[1, 2]✉, Anton V. Terekhov[1], Dmitriy V. Bantsev[2]

[1] *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

[2] *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

✉*aafygina@aari.ru*

AVT, 0000-0002-8300-6883

Abstract. Using Bennett Island (East Siberian Sea) as a case study, the role of shortwave radiation was examined in shaping the spatial distribution of the mass balance of Arctic ice caps. The aim of the study was to quantitatively assess the influence of spatial variability in insolation on glacier surface lowering. Changes in the surface elevation of four ice caps on Bennett Island, with a total area of approximately 56 km², over the period 2012–2022 were previously derived from multi-temporal ArcticDEM data. On average, the elevation change amounted to −6.27 ± 0.12 m, corresponding to a mass balance of −5.33 ± 0.39 m w. e. The mean incoming clear-sky shortwave radiation flux for a typical ablation season (76 frost-free days per year, based on ERA5-Land reanalysis data for 1994–2024) was modeled in SAGA GIS, taking into account both astronomical and terrain-related factors. The resulting distribution of values is characterized by spatial heterogeneity and direct dependencies on exposure and slope shading. The spatial variability of clear-sky insolation across the ice caps ranged from 360 to 520 W/m². For two of the ice caps, a statistically significant positive relationship between surface lowering and insolation was identified, with a linear trend of 0.013–0.021 m of additional melt per 1 W/m². Also, for two larger domes, a positive trend of ice melt was revealed, which equals 1.115–1.750 m per 100 m of altitude. It was shown that for smaller ice caps, the maximum differences in clear-sky insolation (160 W/m²) were equivalent to the effect of an elevation gradient of 100–200 m. For the largest ice cap, Toll, the influence of insolation could not be evaluated: due to horizontal ice motion, surface lowering derived using the geodetic method did not directly correspond to the actual melt. Therefore, further investigation required in situ mass balance measurements using the glaciological method.

Keywords: glacier mass balance, glaciers of the Arctic zone, glacier surface insolation, short-wave radiation, islands of the East Siberian Sea

For citation: Fygina A.A., Terekhov A.V., Bantsev D.V. Influence of insolation patterns on the spatial distribution of mass balance of ice caps on Bennett Island (East Siberian Sea). *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(3):453–466. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-3-453-466

Received 20.04.2026 **Revised 07.07.2026** **Accepted 13.07.2026**

Введение

Коротковолновая радиация (КВР) — основной источник энергии и главный драйвер климатических процессов на Земле [1]. Для большинства центров современного оледенения именно КВР занимает основную долю приходной части теплового баланса [2], в том числе в Арктике [3]. Поэтому влияние солнечной радиации на баланс массы изучалось с разных точек зрения: рассматривалось как влияние долгопериодических колебаний приходящего потока радиации [4], так и изменения отражательных свойств самой ледниковой поверхности [5, 6]; были предприняты попытки дополнить температурно-индексные модели с учетом радиационного фактора [7, 8]; проведены исследования различных параметризаций радиационного баланса в гляциологическом моделировании (например, [9]); изучена чувствительность моделей к различным вариантам радиационного форсинга [10] и к пространственному

разрешению [11]. Было также показано, как на таяние ледников влияет затенение окружающим рельефом (см., например, [12], [13]).

Распределение величины баланса массы непосредственно на поверхности ледника зависит от многих факторов — как от действия высотных градиентов основных метеовеличин [14, 15], так и от неклиматических факторов, например лавинной аккумуляции [16] или ветрового перераспределения снега, в основном зависящих от рельефа [17], однако актуальным фактором также является неравномерность инсоляции [16]. Количественная оценка влияния этой неравномерности была проведена для каровых и горно-долинных ледников Арктики и умеренных широт (например, [7, 19]). Однако для купольного оледенения, гораздо более распространенного в российской высокоширотной Арктике, такая оценка нам неизвестна.

Мы поставили целью количественно оценить влияние неравномерной инсоляции на пространственное распределение баланса массы арктических ледниковых куполов на примере острова Беннетта (Восточно-Сибирское море). Для купольного оледенения фактор затенения поверхности ледника бортами долины гораздо менее актуален. Тем не менее на ледниковых куполах присутствуют поверхности разной крутизны и экспозиции, что также создает предпосылки для неравномерности инсоляции.

Остров Беннетта был выбран не только потому, что для него имеются опубликованные ранее результаты масс-балансовых расчетов за современный период [20]. Этот центр оледенения является крайним восточным в Евразийской Арктике и быстро теряет массу, несмотря на существенное удаление от области наиболее интенсивного «полярного усиления», расположенной в Карском и Баренцевом морях. Будущее исчезновение ледниковых куполов острова Беннетта сместит восточную границу оледенения высокоширотной Арктики практически на 50 градусов долготы, до архипелага Северная Земля [20]. Остров Беннетта примечателен также с точки зрения гляциоклиматологии, поскольку характеризуется малым годовым количеством осадков с максимумом в летние месяцы, что делает аккумуляцию более низкой, чем на соседних архипелагах [20]. Кроме того, будучи крайне труднодоступной территорией, остров остается одним из наименее изученных в нашей стране, равно как и факторы, влияющие на его оледенение. Такие особенности острова Беннетта и предопределили его выбор в качестве объекта исследования.

Объект изучения

Остров Беннетта расположен в северной части архипелага Новосибирские острова, разделяющего моря Лаптевых и Восточно-Сибирское (рис. 1), и принадлежит группе островов Де-Лонга [21]. Площадь острова Беннетта составляет 156,25 км^2, около трети ее занимают четыре отдельных ледниковых купола (Де-Лонга Западный, Де-Лонга Восточный, Толля и Малый) общей площадью 65,87 км^2 (рис. 1) [22]. Остров сложен сланцами, известняками, песчаниками, а также гранитами и базальтами, выходы которых обычны на более возвышенных участках. Значительные площади покрыты аллювиальными, озерно-аллювиальными, морскими и ледниковыми четвертичными отложениями, среди которых залегают мощные горизонты подземных льдов[1]. Ледники расположены в основном на базальтовых плато, ограниченных крутыми уступообразными склонами [22, 23].

[1] Физическая география — Островная Арктика. 2016. Режим доступа: https://arz.unn.ru/2016-05-16-10-34-33/1179-2016-05-19-07-33-32 (дата обращения: 10.04.2026).

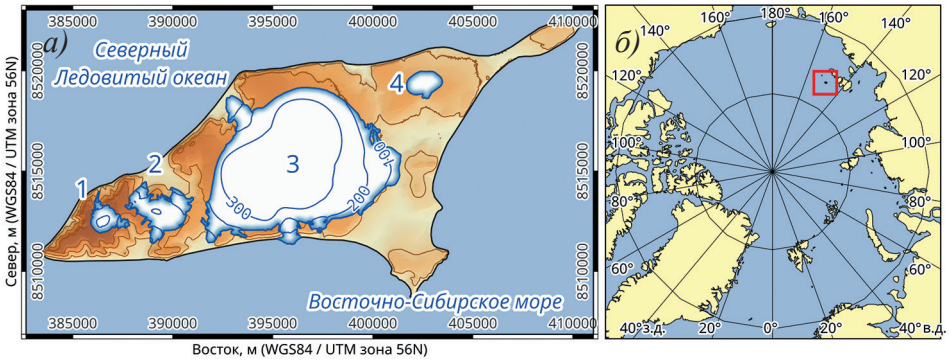


Рис. 1. Ледниковые купола острова Беннетта (*а*): 1 — Де-Лонга Западный, 2 — Де-Лонга Восточный, 3 — Толля, 4 — Малый, и расположение острова на карте Арктики (*б*)

Fig. 1. Bennett Island ice caps (*a*): 1 — De-Long West Ice Cap, 2 — De-Long East Ice Cap, 3 — Toll Ice Cap, 4 — Maliy Ice Cap, and the location of Bennett Island in the Arctic (*б*)

Климат острова арктический морской. Средние температуры января — около –30 °С, июля — около 3 °С, годовая сумма осадков — до 130 мм в год, с максимумом в летние месяцы. Снежный покров держится более 9 месяцев в году. Для свободных от оледенения территорий характерны ландшафты разреженной арктической пустыни[2].

Материалы и методы

Современный баланс массы. Для того чтобы оценить влияние инсоляции на пространственное распределение баланса массы ледниковых куполов острова Беннетта, мы воспользовались готовыми растрами с пространственным разрешением 2 м на пиксель, представляющими собой изменение высоты ледниковой поверхности, рассчитанное геодезическим методом за 2012–2022 гг. (рис. 2). Это наиболее современная из известных в литературе оценок для оледенения острова, проведенная на основе разновременных фрагментов цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM и представленная ранее в работе А. Терехова и соавторов [19].

Сезон абляции. Для того чтобы получить представление о типичной продолжительности и датах сезона абляции ледников острова Беннетта, где нет постоянно действующих метеостанций, нами были использованы суточные данные реанализа ERA5-Land. За сезон абляции условно был принят осредненный период положительных среднесуточных температур, рассчитанный за последний доступный тридцатилетний период 1994–2024 гг.

Ранее было высказано предположение, что для описания климата острова Беннетта можно использовать ряды с метеостанции, расположенной на острове Котельный [22]. Однако позднее результат такой аппроксимации был признан неудовлетворительным [20]. Вероятная причина состоит в том, что метеостанция не только расположена на берегу другого моря — Лаптевых, но также и отделена от Восточного-Сибирского моря крупным фрагментом суши, а потому не характеризует климат острова Беннетта.

[2] Новосибирские острова. Большая российская энциклопедия. 2024. Режим доступа: https://bigenc.ru/c/novosibirskie-ostrova-7b6543 (дата обращения: 10.04.2026).

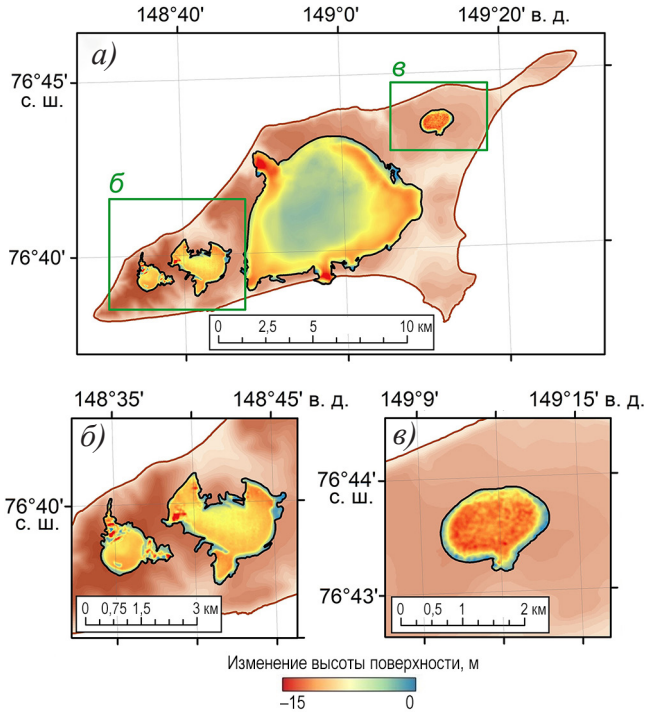


Рис. 2. Снижение поверхности ледниковых куполов острова Беннетта (*а*), куполов Де-Лонга Западного и Восточного (*б*) и купола Малого (*в*) с 2012 по 2022 г., рассчитанное геодезическим методом по ЦМР ArcticDEM

Fig. 2. Surface lowering of the ice caps on Bennett Island (*a*), De-Long West Ice Cap and De-Long East Ice Cap (*б*), Maliy Ice Cap (*в*) from 2012 to 2022, derived using the geodetic method from ArcticDEM data

Расчет инсоляции. Для оценки распределения величины потока приходящей коротковолновой радиации при ясном небе на поверхности ледниковых куполов были использованы данные о поверхности рельефа — фрагменты ЦМР ArcticDEM на 2012 г. ЦМР была предварительно сглажена для устранения случайных высокочастотных шумов, возникающих вследствие несовершенства технической обработки исходных оптических фотоснимков. Фильтрация производилась при помощи программного обеспечения SAGA GIS инструментом Simple Filter.

Поток приходящей КВР при ясном небе был смоделирован за осредненный сезон абляции при помощи инструмента Potential Incoming Solar Radiation в SAGA GIS. Алгоритм учитывает как астрономический фактор, т. е. суточное и годичное движение Солнца, так и морфометрический — экспозицию и уклон поверхности, а также затенение окружающими формами рельефа [24].

Статистические оценки. На основе имеющихся данных о распределении значений инсоляции по поверхности ледников, высоты их поверхности и ее изменений за период 2012–2022 г. нами были проанализированы два вида связи: 1) зависимость величины таяния от потока коротковолновой радиации; 2) зависимость величины таяния от высоты над уровнем моря.

Результаты

Общая характеристика

По данным реанализа ERA5-Land, за период тридцатилетней климатической нормы 1994–2024 гг. продолжительность периода положительных среднесуточных температур воздуха составляла на острове Беннета 76 суток, с 11 июня по 26 августа (рис. 3). Такая продолжительность безморозного периода типична для территорий с арктическим морским климатом северо-востока России. Рассчитанные по реанализу даты были приняты за условный осредненный сезон таяния ледников, за который далее проводилась представленная оценка инсоляции при ясном небе.

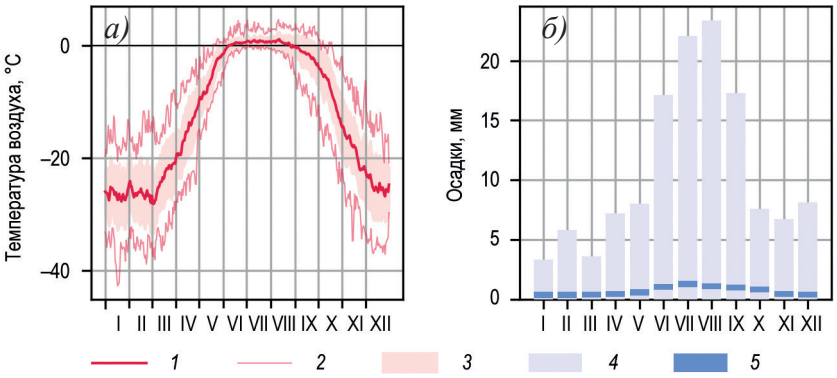


Рис. 3. Осредненный внутригодовой ход температуры воздуха (*а*) и атмосферных осадков (*б*) на острове Беннетта в 1994–2024 гг. (по данным реанализа ERA5-Land):
1 — средняя температура; *2* — ее минимум и максимум; 3 — среднее квадратическое отклонение; *4* — амплитуда месячных сумм осадков; *5* — средняя сумма осадков

Fig. 3. Mean intra-annual variation of air temperature (*а*) and atmospheric precipitation (*б*) on Bennett Island for 1994–2024 (based on ERA5-Land reanalysis data):
1 — mean temperature; *2* — minimum and maximum temperature; *3* — standard deviation; *4* — range of monthly precipitation totals; *5* — mean precipitation total

Распределение значений инсоляции при ясном небе по поверхности ледниковых куполов было получено в программе SAGA GIS. Карта-схема (рис. 4) наглядно показывает неоднородное пространственное распределение этих значений. Минимум и максимум инсоляции на поверхности куполов составляет от 360 до 520 Вт/м^2, что дает амплитуду значений в 160 Вт/м^2. Величины инсоляции распределены закономерно, сообразно экспозиции куполов, однако такое распределение осложнено крутизной их склонов, а также затенением. Кроме того, на инсоляцию влияют индивидуальные морфологические особенности куполов: в то время как относительно плоская вершина купола Толля освещена довольно равномерно, на остальных куполах подобной области не выделяется.

Полученные в результате моделирования значения следует считать «оценкой сверху», т. е. максимально возможным потоком КВР на поверхности ледниковых куполов, поскольку моделирование не учитывает главный фактор, контролирующий реальный поток КВР в Арктике, — облачность. В действительности из-за рассеяния КВР облачностью контраст между наиболее освещенными и затененными областями будет ниже, чем показано на рис. 3.

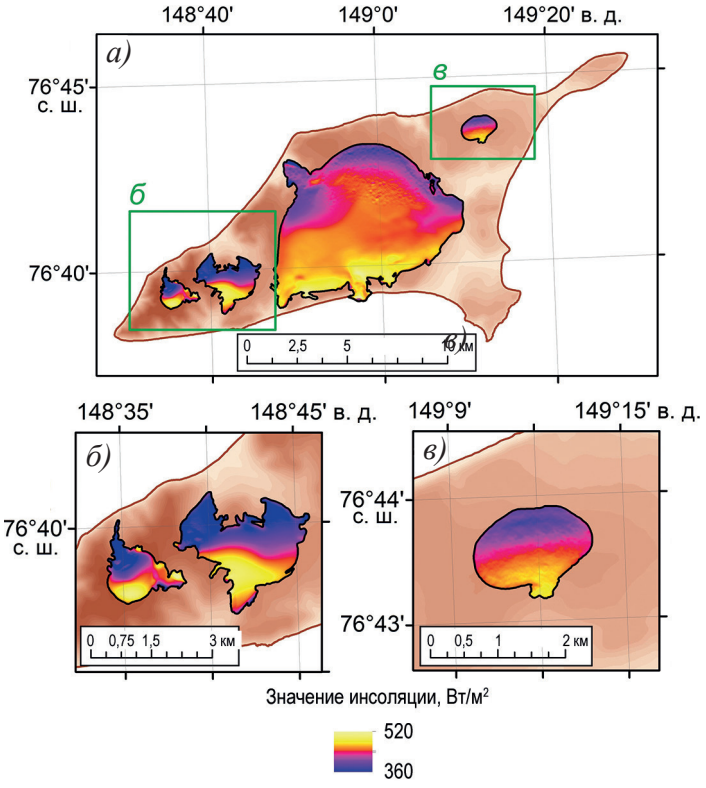


Рис. 4. Инсоляция ледниковых куполов острова Беннетта (*а*), куполов Де-Лонга Западного и Восточного (*б*) и купола Малого (*в*) при ясном небе (за усредненный сезон абляции с 11 июня по 26 августа)

Fig. 4. Clear-sky insolation of the ice caps on Bennett Island (*a*), De-Long West Ice Cap and De-Long East Ice Cap (*б*), Maliy Ice Cap (*в*) (averaged over the ablation season from 11 June to 26 August)

Рассмотрим влияние двух факторов — высоты поверхности и инсоляции при ясном небе — на пространственное распределение баланса массы каждого из ледниковых куполов по отдельности, с запада острова Беннетта на восток.

Купол Де-Лонга Западный

Этот купол представляет идеальный объект для демонстрации предполагаемой нами зависимости. Если рассматривать связь таяния поверхности купола с высотой над уровнем моря, то такая связь окажется противоположна ожидаемой (рис. 5*а*): с ростом высоты растет и таяние. Такое кажущееся противоречие объясняется малой мощностью льда в низовьях купола, в тех областях, откуда лед отступил за рассматриваемый период 2012–2022 гг. Если исключить из анализа эти области, примерно ниже отметки 390 м, то связь между таянием и высотой поверхности и вовсе не прослеживается. Однако, если раскрасить облако точек по значениям инсоляции при ясном небе, станет видно, что таяние при равной высоте проявляет зависимость от этого параметра: большие значения инсоляции ведут к большему таянию, и наоборот. Такая визуальная оценка подтверждается статистическими расчетами (рис. 5*б*): тренд изменения высоты поверхности в зависимости от инсоляции прослеживается

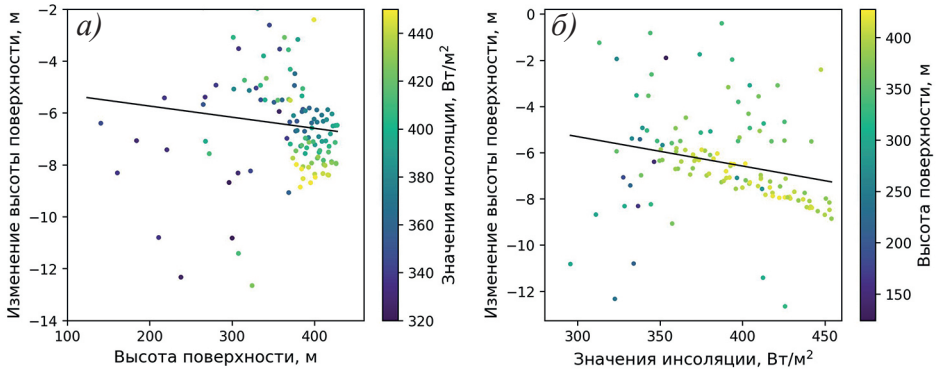


Рис. 5. Зависимость изменений высоты поверхности купола Де-Лонга Западного от высоты над уровнем моря (*а*) и от инсоляции при ясном небе (*б*) в 2012–2022 гг.

Fig. 5. Relationship between surface elevation change of the De-Long West ice cap in 2012–2022 and altitude (*а*) and clear-sky insolation (*б*)

достаточно четко, будучи значимым при α = 0,05, и соответствует градиенту в дополнительные 0,013 м снижения поверхности на каждый 1 Вт/м² инсоляции.

Купол Де-Лонга Восточный

На куполе Де-Лонга Восточном, в отличие от Западного, ожидаемая связь таяния с высотой над уровнем моря действительно проявляется (рис. 6*а*).

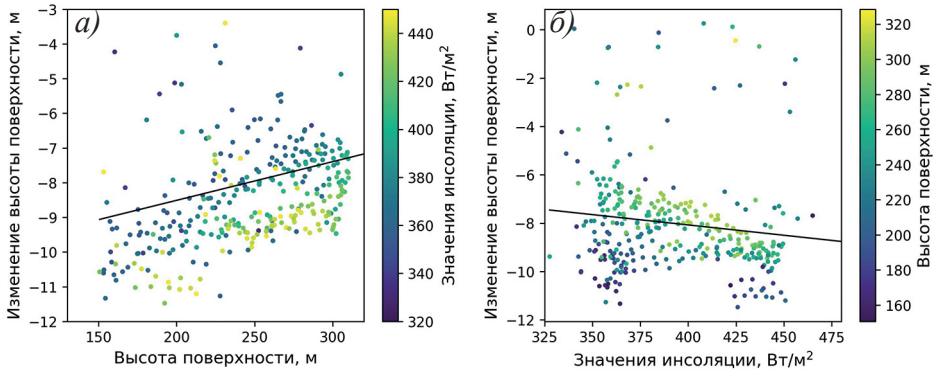


Рис. 6. Зависимость изменений высоты поверхности купола Де-Лонга Восточного от высоты над уровнем моря (*а*) и от инсоляции при ясном небе (*б*) в 2012–2022 гг.

Fig. 6. Relationship between surface elevation change of the De-Long East ice cap in 2012–2022 and altitude (*а*) and clear-sky insolation (*б*)

Купол Толля

Сильно отличны от всех закономерности, полученные для ледникового купола Толля. Из-за больших размеров и множества действующих факторов закономерности осложнены выбросами, связанными с наличием движения по краям ледника. Для уменьшения погрешности самые крупные выводные языки не были взяты в расчет. По графику (рис. 7*а*) видно, что зависимость от высоты у таяния обратная и устойчивая для большинства точек.

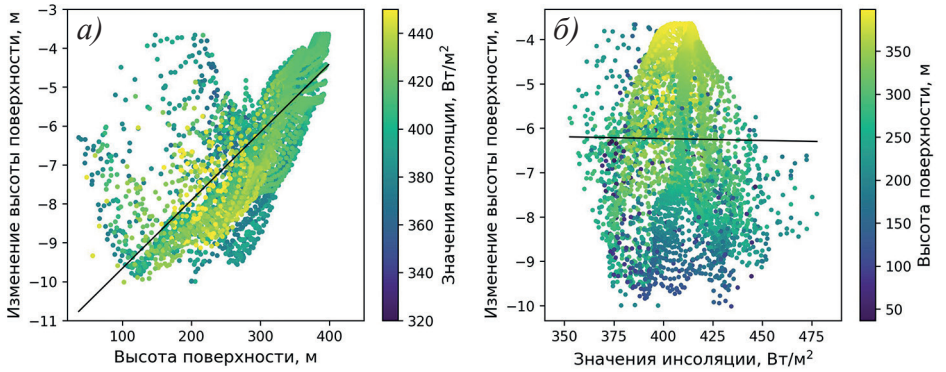


Рис. 7. Зависимость изменений высоты поверхности купола Толля от высоты над уровнем моря (*а*) и от инсоляции при ясном небе (*б*) в 2012–2022 гг.

Fig. 7. Relationship between surface elevation change of the Toll ice cap in 2012–2022 and altitude (*a*) and clear-sky insolation (*б*)

Купол Малый

Для этого купола картина пространственного распределения таяния (рис. 8) напоминает аналогичную для Де-Лонга Западного: связь снижения поверхности с высотой отсутствует (или вовсе оказывается «перевернутой», если брать в расчет нижнюю часть ледника). Зависимость от инсоляции также значима и составляет 0,184, будучи эквивалентной 0,021 м снижения поверхности на каждый 1 Вт/м^2 инсоляции.

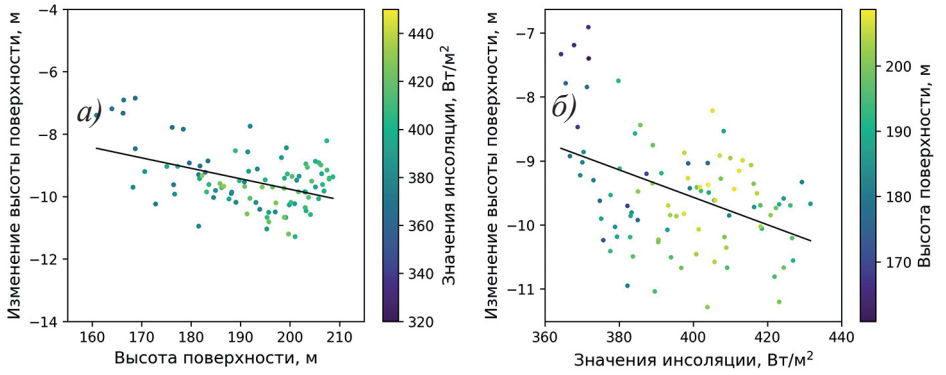


Рис. 8. Зависимость изменений высоты поверхности купола Малый от высоты над уровнем моря (*а*) и от инсоляции при ясном небе (*б*) в 2012–2022 гг.

Fig. 8. Relationship between surface elevation change of the Maliy ice cap in 2012–2022 and altitude (*a*) and clear-sky insolation (*б*)

Обсуждение

Большинство предыдущих исследований влияния инсоляции на баланс массы выполнено для горно-долинных и каровых ледников, где пространственные различия в радиационном режиме определяются затенением окружающим рельефом и экспозицией языка (например, [12, 13, 18, 19]). Для купольных ледников подобные количественные оценки практически отсутствуют. В настоящей работе впервые для арктического

купольного оледенения получена количественная оценка связи между пространственной неоднородностью инсоляции и балансом массы. Показано, что даже на относительно простых по форме ледниковых куполах различия в инсоляции могут быть статистически значимым фактором пространственной изменчивости баланса массы.

Представленный результат, однако, может показаться противоречивым: несмотря на то, что все четыре купола острова Беннетта расположены в пределах одного небольшого острова, то есть в одинаковых климатических условиях, статистическая зависимость баланса их массы от инсоляции при ясном небе значительно разнится. Купола Де-Лонга Западный и Малый имеют наименьший диапазон высот — 310 и всего 50 м по состоянию на 2022 г. (таблица). Зависимости таяния от высоты для них не прослеживается вовсе, поскольку разброс значений снижения поверхности на одной высоте сопоставим с полным диапазоном этой величины (см. рис. 3*а* и 6*а* соответственно). Для этих куполов снижение поверхности зависит скорее от особенностей инсоляции, нежели от высоты. Для купола Де-Лонга Восточный зависимость от инсоляции также прослеживается, однако на фоне высотной зависимости ее сила незначительна.

Таблица

Статистические параметры зависимости снижения поверхности ледниковых куполов острова Беннетта в 2012–2022 гг. от высоты над уровнем моря и инсоляции при ясном небе

Table

Statistical parameters showing the dependence of the decrease in the surface of the glacial domes of Bennett Island in 2012–2022 on the altitude above sea level and insolation under clear skies

Название ледникового купола	Диапазон высот, м н. у. м.	Наклон тренда, м на Вт/м^2	R^2 (для зависимости от инсоляции)	Наклон тренда, м на 100 м высоты	R^2 (для высотной зависимости)
Де-Лонга Западный	120–430	–0,013	0,05	–0,429	0,02
Де-Лонга Восточный	75–330	–0,008	0,0173	1,115	0,05
Толля	5–400	0,004	0,0064	1,750	0,57
Малый	160–210	–0.021	0,184	–3,353	0,20

Наиболее наглядно можно сравнить силу двух видов зависимости следующим образом. Максимальный высотный градиент таяния, наблюдаемый на куполе Толля, составляет 1,750 м на 100 м высоты. Поскольку линейный тренд таяния в зависимости от инсоляции составляет 0,01–0,02 см снижения поверхности на 1 Вт/м^2 (см. таблицу), а полный диапазон этой величины на острове — 160 Вт/м^2, то максимальные различия в таянии малых куполов из-за неравномерности инсоляции составляют примерно 1,60–3,20 м, что эквивалентно действию высотного градиента в 100–200 м высоты.

Для купола Толля проследить зависимость от инсоляции оказалось невозможным. Мы объясняем этот факт ограничениями данных геодезического метода. С ростом скорости течения льда изменение высоты поверхности в каждой точке перестает быть тождественным поверхностному таянию, в большей мере определяясь движением ледника, нежели балансом массы [25]. В нашем распоряжении нет фактических данных о скоростях ледниковых куполов острова Беннетта; однако для арктических ледников с холодным ложем, к числу которых относятся изучаемые

купола, известно, что их движение обусловлено внутренней деформацией льда под действием напряжения сдвига. При этом с ростом напряжения сдвига возрастает и скорость движения [26]. Напряжение сдвига пропорционально мощности ледника и уклонам его поверхности — следовательно, можно ожидать, что именно у купола Толля (как наиболее крупного и занимающего наибольший интервал абсолютных высот) движение льда будет максимально.

Логичным «исправлением» подобного несовершенства геодезического метода могла бы являться его замена измерениями по абляционным рейкам и шурфам. К сожалению, ледниковые купола российского сектора Арктики сравнительно мало изучены, что в особенности касается натурных измерений баланса. Это и налагает главное ограничение на наше исследование: для оценки пространственного распределения баланса массы мы вынуждены использовать результаты геодезического метода, основанного на вычитании разновременных материалов дистанционного зондирования. Вероятно, повторить подобное исследование, но с задействованием данных гляциологического метода можно было бы для куполов архипелага Северная Земля, где мониторинговые работы ведутся сразу на двух куполах — Мушкетова и Семенова-Тян-Шанского [27].

Другим ограничением нашего исследования является малая распространенность актинометрических исследований. Таковые если и проводятся на арктических ледниках, то не покрывают их поверхность целиком, не позволяя тем самым выявить пространственную неоднородность инсоляции [28]. В качестве предиктора для исследования связи с КВР нами была использована инсоляция именно при ясном небе, как более легкая для моделирования величина. Однако для высокоширотной Арктики ясные условия не характерны [29]. Это означает, что в действительности контраст между частями куполов с разной освещенностью будет несколько меньше, поскольку при наличии облачности соотношение прямой и рассеянной радиации смещается в сторону увеличения последней. Следовательно, величины градиентов таяния, выраженные в метрах на Вт/м^2, которые мы получили для куполов острова Беннета, можно считать заниженными: если считать их относительно реального потока КВР, *меньшего*, знаменатель в соотношении «разница таяния, деленная на разницу инсоляции» будет меньше.

Величину, которую мы моделировали, — инсоляцию при ясном небе — лучше считать не климатической, поскольку она достижима только в теории, а морфометрической: то есть показателем, отражающим суммарное действие крутизны склона, экспозиции, влияние затенения окружающим рельефом и дат периода абляции. Реальное распределение инсоляции вряд ли возможно измерить натурно: даже если установить актинометры в нескольких точках на леднике, интер- и экстраполяция этой величины все равно потребует привлечения математического моделирования. А инсоляцию при ясном небе смоделировать достаточно просто: для этого необходима только ЦМР.

Выводы

Пространственная изменчивость таяния рассматривается, как правило, через высотную зависимость, которая аппроксимирует собой совокупное действие вертикальных градиентов основных метеовеличин. Однако для небольших ледниковых куполов острова Беннетта показано, что влияние высоты на таяние может быть слабым или вовсе не проявляться, тогда как различия в инсоляции объясняют существенную часть наблюдаемой неоднородности баланса. Мы оценили эту зависимость количественно:

на 1 Вт/м^2 инсоляции при ясном небе баланс становится более отрицательным на 0,01–0,02 м в. э. С учетом полного диапазона смоделированных значений инсоляции при ясном небе это эквивалентно действию высотного градиента в 100–200 м. Таким образом, для малых купольных ледников экспозиция и уклон поверхности, определяющие распределение приходящей коротковолновой радиации, могут играть роль, сопоставимую с действием высотного градиента температуры воздуха.

Для крупных куполов, таких как купол Толля, анализ затруднен движением ледникового льда, поскольку для таких объектов снижение их поверхности в каждой точке не тождественно поверхностному таянию. Поэтому геодезический метод, вероятно, мало подходит для выполнения подобного анализа на больших куполах либо требует коррекции за скорость течения льда. Гляциологический масс-балансовый мониторинг не распространен в российском секторе Арктики, однако он проводится на двух куполах Северной Земли. Для них перспективно было бы провести схожий анализ, но по результатам измерений гляциологическим методом.

Несмотря на все ограничения исходных данных, простой способ оценки инсоляции при ясном небе, который требует на входе только наличия ЦМР, выглядит перспективным для исследования пространственной неоднородности арктических куполов. Этот способ учитывает совместное действие и экспозиции, и крутизны склона, и затенения. Кроме того, он дает количественную оценку неравномерности инсоляции, а не качественные категории вида «южный склон — северный склон».

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы НИТР Росгидромета 5.1 на 2025–2029 гг. «Развитие моделей и методов мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, исследования процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики».

Competing interests. The authors have no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the NITR program of Roshydromet 5.1 for 2025–2029, “Development of models and methods for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers, and permafrost, as well as the study of ice interaction processes with natural objects and engineering structures for the Arctic”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Stephens G., Li J., Wild M., Clayson C.A., Loeb N., Kato S., L’Ecuyer T., Stackhouse P.W. Jr., Lebsock M., Andrews T. An update on Earth’s energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*. 2012;5:691–696. https://doi.org/10.1038/ngeo1580
2. Smith T., Smith M.W., Chambers J.R., Sailer R., Nicholson L., Mertes J., Quincey D.J., Carrivick J.L., Stiperski I. A scale-dependent model to represent changing aerodynamic roughness of ablating glacier ice based on repeat topographic surveys. *Journal of Glaciology*. 2020;66(260):950–964. https://doi.org/10.1017/jog.2020.56
3. Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Romashova K.V., Barskov K.V., Chechin D.G., Verkulich S.R. Impact of extreme weather events on the surface energy balance of the low-elevation Svalbard glacier Aldegondabreen. *Water*. 2025;17(2):274. https://doi.org/10.3390/w17020274
4. Huss M., Funk M., Ohmura A. Strong Alpine glacier melt in the 1940s due to enhanced solar radiation. *Geophysical Research Letters*. 2009;36:L23501. https://doi.org/10.1029/2009GL040789
5. Bonekamp P.N.J., de Kok R.J., Collier E., Immerzeel W.W. Contrasting meteorological drivers of glacier mass balance between the Karakoram and Central Himalaya. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:107. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00107

6. Gunnarsson A., Gardarsson S.M., Pálsson F. Modeling of surface energy balance for Icelandic glaciers using remote-sensing albedo. *The Cryosphere.* 2023;17:3955–3986. https://doi.org/10.5194/tc-17-3955-2023
7. Hock R., Holmgren B. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology*. 2005;51(172):25–36. https://doi.org/10.3189/172756505781829566
8. Réveillet M., Vincent C., Six D., Rabatel A. Which empirical model is best suited to simulate glacier mass balances? *Journal of Glaciology*. 2017;63(237):39–54. https://doi.org/10.1017/jog.2016.110
9. Mölg T., Cullen N.J., Kaser G. Solar radiation, cloudiness and longwave radiation over low-latitude glaciers: implications for mass-balance modelling. *Journal of Glaciology*. 2009;55(190):292–302. https://doi.org/10.3189/002214309788608822
10. Heynen M., Pellicciotti F., Carenzo M. Parameter sensitivity of a distributed enhanced temperature-index melt model. *Annals of Glaciology*. 2013;54(63):311–321. https://doi.org/10.3189/2013AoG63A537
11. Hopkinson C., Chasmer L., Munro S., Demuth M.N. The influence of DEM resolution on simulated solar radiation-induced glacier melt. *Hydrological Processes*. 2010;24:775–788. https://doi.org/10.1002/hyp.7531
12. Chueca J., Julián A. Relationship between solar radiation and the development and morphology of small cirque glaciers (Maladeta Mountain massif, Central Pyrenees, Spain). *Geografiska Annaler: Series A*. 2004;86:81–89. https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2004.00215.x
13. 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
14. Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха. *Материалы гляциологических исследований*. 1966;(12):153–164.

    Krenke A.N., Khodakov V.G. On the relationship of surface melting of glaciers with air temperature. *Materials of glaciological research*. 1966;(12):153–164. (In Russ.).
15. Rasmussen L.A. Altitude variation of glacier mass balance in Scandinavia. *Geophysical Research Letters*. 2004;31(13). https://doi.org/10.1029/2004GL020273
16. Hynek B., Binder D., Citterio M., Larsen S.H., Abermann J., Verhoeven G., Schöner W. Accumulation by avalanches as a significant contributor to the mass balance of a peripheral glacier of Greenland. *The Cryosphere*. 2024;18(11):5481–5494. https://doi.org/10.5194/tc-18-5481-2024
17. Freudiger D., Kohn I., Seibert J., Stahl K., Weiler M. Snow redistribution for the hydrological modeling of alpine catchments. *WIREs Water.* 2017;4:e1232. https://doi.org/10.1002/wat2.1232
18. Arnold N.S., Rees W.G., Hodson A.J., Kohler J. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2006;111(F2). https://doi.org/10.1029/2005JF000426
19. Терехов А.В., Прохорова У.В., Демидов В.Э. Влияние пространственной изменчивости солнечной радиации на баланс массы ледников залива Грён-фьорд (архипелаг Шпицберген). *Лёд и Снег*. 2024;64(1):41–53. https://doi.org/10.31857/S2076673424010039

    Terekhov A.V., Prokhorova U.V., Demidov V.E. The influence of spatial variability of solar radiation on the mass balance of glaciers in Grenfjord Bay (Svalbard Archipelago). *Ice and Snow*. 2024;64(1):41–53. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2076673424010039
20. Terekhov A.V., Prokhorova U.V., Verkulich S.R., Demidov V.E., Anisimov M.A., Griga S.A. Revisiting the mass balance of Bennett Island glaciation, East Siberian Sea. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2025;57(1):2483781. https://doi.org/10.1080/15230430.2025.2483781

21. Данукалова М.К., Кузьмичев А.Б., Коровников И.В. Кембрий острова Беннетта (Новосибирские острова). *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2014;22(4):3. https://doi.org/10.7868/S0869592X14040048

    Danukalova M.K., Kuzmichev A.B., Korovnikov I.V. Cambrian of Bennett Island (New Siberian Islands). *Stratigraphy. Geological correlation*. 2014;22(4):3. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0869592X14040048

22. Веркулич С.Р., Крусанов А.Г., Анисимов М.А. Современное состояние и тенденции оледенения о. Беннетта за последние 40 лет. *Материалы гляциологических исследований*. 1990;(70):111–115.

    Verkulich S.R., Krusanov A.G., Anisimov M.A. The current state and trends of glaciation of Bennett Island over the past 40 years. *Glaciological research materials*. 1990;(70):111–115. (In Russ.).

23. Ли Г., Гайнанов В.Г., Зверев А.С. Некоторые черты геологического строения донных отложений вокруг острова Беннетта по сейсмоакустическим данным. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2023;(6):130–133. https://doi.org/ 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-130-133

    Lee G., Gainanov V.G., Zverev A.S. Some features of the geological structure of bottom sediments around Bennett Island according to seismoacoustic data. *Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology.* 2023;(6):130–133. (In Russ.). https://doi.org/ 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-130-133

24. 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

25. 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. *The Cryosphere*. 2021;15:1259–1276. https://doi.org/10.5194/tc-15-1259-2021

26. Nye J.F. A method of calculating the thicknesses of the ice-sheets. *Nature*. 1952;169(4300):529–530. https://doi.org/10.1038/169529a0

27. Большиянов Д.Ю., Соколов В.Т., Ёжиков И.С., Булатов Р.К., Рачкова А.Н., Федоров Г.Б., Парамзин А.С. Условия питания и изменчивость ледников архипелага Северная Земля по результатам наблюдений 2014–2015 гг. *Лёд и Снег*. 2016;56(3):358–368. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368

    Bolshiyanov D.Yu., Sokolov V.T., Yezhikov I.S., Bulatov R.K., Rachkova A.N., Fedorov G.B., Paramzin A.S. Nutritional conditions and variability of glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago based on the results of observations in 2014–2015. *Ice and Snow.* 2016;56(3):358–368. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368

28. Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Narizhnaya A.I. Incoming shortwave radiation in the Barentsburg area, Spitzbergen, 2015–2025. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(1):52–64. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-52-64

29. Chernokulsky A., Esau I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012. *International Journal of Climatology*. 2019;39(15):5771–5790. https://doi.org/10.1002/joc.6125