

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324

ВЫСОТА ГРАНИЦЫ ПИТАНИЯ НА КУПОЛЕ БЕЛЛИНСГАУЗЕН, АНТАРКТИКА

© 2023 г. Б. Р. Мавлюдов^{1,*}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: bulatrm@bk.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

Получены данные о высоте границы питания (ELA) для ледникового купола Беллинсгаузен на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) в Антарктике за 2007–2012 и 2014–2023 гг. Восстановлен характер изменения ELA для купола с 1947 г. по настоящее время. Выявлена синхронность изменения ELA на островах Кинг-Джордж и Ливингстон.

Ключевые слова: высота границы питания, ледниковый купол Беллинсгаузен, средняя летняя температура воздуха

DOI: 10.31857/S2076673423040117, **EDN:** FQSJXK

На основе анализа положения высоты границы питания (далее — ELA (Equilibrium Line Altitude)) на небольшом ледниковом куполе Беллинсгаузен на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) в Антарктике, полученной при наземных гляциологических исследованиях за период наблюдений 2007–2012 и 2014–2023 гг. была обнаружена хорошая связь между положением ELA и средней летней температурой воздуха (XII–II месяцы) с коэффициентом детерминации около 0.8. Исходя из предположения о стабильности этой связи и в прошлом, это позволило восстановить ход изменения положения ELA в течение всего периода инструментальных наблюдений на метеостанции Беллинсгаузен (с 1968 г.). Поскольку для некоторых лет были получены отрицательные значения положения ELA, что физически невозможно, их искусственно приравнивали к уровню моря. Хорошая связь метеоданных, полученных на метеостанции Беллинсгаузен и на метеостанции острова Десеппшен позволила продлить ряд изменений положения ELA на более длительный период (с 1947 г.). Сгладив сильные межгодовые изменения положения ELA при помощи пятилетнего скользящего осреднения, выявлены два полных периода изменения положения ELA (от минимума до минимума) продолжительностью около 20 лет (1947–1968 гг.) и 45 лет (1968–2013 гг.). С 2014 г. по настоящее время продолжается третий период. На апогее каждого периода положение ELA оказывалось выше высоты ледникового купола Беллинсгаузен, что говорит о том, что в эти годы ледниковый купол полностью терял область аккумуля-

ции. Для ледниковых куполов Беллинсгаузен и Варшава выявлена закономерность более высокого положения ELA на западных и южных склонах по сравнению с восточными, что, вероятно, применимо ко всему острову Кинг-Джордж. Поскольку изменение ELA на острове Кинг-Джордж синхронно с изменением высоты границы питания на острове Ливингстон, то данные положения ELA на ледниковом куполе Беллинсгаузен, вероятно, могут быть полезными для восстановления истории оледенения на Южных Шетландских островах.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика высоты границы питания (далее — ELA) важна для понимания эволюции конкретных ледников и оледенения всего региона. Высота границы питания может быть рассчитана для конкретного балансового года, ряда лет или для устойчивого положения ледника (Ahlmann, 1924; Atle, 1992). Поскольку ELA является параметром, равновесным с климатом, она зависит от ряда процессов, связанных с аккумуляцией и абляцией. Среди них самые важные — накопление и перераспределение зимних осадков, а также изменение летних температур воздуха. Скорость прироста или убыли массы ледника зависит от его местоположения. Считается, что ледники находятся в устойчивом состоянии, если площадь аккумуляции вдвое превышает площадь абляции (Braithwaite, Muller, 1980). Положение ELA сильно меняется год от года, поэтому обычно исполь-

зуют её значение, осреднённое за несколько лет (не менее пяти).

Поскольку положение высоты границы питания определяется колебаниями климата, оно может быть использовано для палеогеографических построений, связанных с изменением размеров оледенения (Braithwaite, Müller, 1980). Для определения положения ELA в настоящем и прошлом используются различные методики (Kuhle, 1988; Atle, 1992). Однако для всех этих построений важно, чтобы градиент изменения высоты границы питания во времени был линейным (Braithwaite, Müller, 1980). Самым надёжным методом определения ELA служат полевые измерения баланса массы. Другие методы используются в тех случаях, когда нет полевых измерений.

Высоту границы питания изучали на многих ледниках в разных районах нашей планеты. Как и сами ледники, ELA изменяется по своему высотному положению, располагаясь вблизи уровня моря в полярных регионах и поднимаясь высоко в горы при удалении от полюсов (Гляциологический..., 1984). Изучению высоты границы питания посвящены многочисленные публикации (Müller, 1980; Кренке, 1982; Kuhle, 1988; Atle, 1992; Braithwaite et al., 2022). Однако для северной части Антарктического полуострова и Южных Шетландских островов они немногочисленны.

Высота границы питания ледников на о. Кинг-Джордж детально не изучалась. По отдельным отрывочным сведениям можно установить ELA в отдельные годы на ледниках, где проводились гляциологические исследования. Анализ изменения положения высоты границы питания во времени для Южных Шетландских Островов выполнен в работах (Braun, 2001; Falk et al., 2018; Dziembowski, Bialik, 2022), но из-за недостатка данных никаких закономерностей обнаружено не было. Наибольшее количество масс балансовых наблюдений выполнено на ледниковом куполе Беллинсгаузен, расположенном в северо-восточной части полуострова Файлдс на западе самого большого острова архипелага — Кинг-Джордж.

Отрывочные сведения о ELA на острове можно получить из работ российских учёных (Заморуев, 1972; Орлов, 1973), проводивших исследования на Малом ледниковом куполе (ныне ледниковый купол Беллинсгаузен) в 1968–1971 гг. В это время граница питания находилась на высоте 150–170 м. По данным китайских исследователей (Wen et al., 1998) в 1985–1992 гг. ELA располагалась также на высоте 150 м над ур. моря, откуда делался вывод о стабильности оледенения купола (Wen et al., 1994). Высота границы питания стала меняться в конце XX — начале XXI столетий, когда она начала постепенно подниматься, достигнув в 2004 г. вершины ледникового купола, т.е. высоты 250 м над ур. моря (Brawn, 2001; Brawn,

2009, устное сообщение). Наши исследования баланса массы ледникового купола (Мавлюдов, 2014), проводившиеся с 2007 по 2022 г. с перерывом в 2012–2013 гг., позволили дополнить имеющиеся данные об ELA, а также выявить закономерности её изменения, что позволило продлить данные о высоте границы питания на весь период инструментальных метеонаблюдения на о. Кинг-Джордж.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На ледниковом куполе Беллинсгаузен установлена сеть из 29 абляционных реек, которая почти наполовину повторяла аналогичную сеть, использовавшуюся немецкими исследователями (Braun, 2001). Наблюдения по рейкам проводились в сезоны абляции 2007–2012 и 2014–2023 гг. с частотой один раз в неделю, что совместно со снегомерной съёмкой в конце периода аккумуляции позволяло подсчитать баланс массы как для каждой точки измерения абляции, так и для всего купола в целом. Расположение реек по профилям на разных высотах и на склонах разной экспозиции дало возможность отмечать высоту ELA не только для всего ледникового купола, но и для этих профилей, то есть для отдельных склонов купола. Для каждого профиля строили график изменения баланса массы с высотой, что позволило рассчитать уровень нулевого баланса или высоту границы питания. Поскольку в большинстве случаев расчётные значения ELA оказывались в верхней части ледникового купола или выше него, для получения среднего значения высоты границы питания они арифметически осреднялись. Изучение динамики ELA показало преимущество гляциологических наблюдений на ледниковом куполе Беллинсгаузен над наблюдениями на других ледниках острова Кинг-Джордж, где ледники ориентированы только в одном направлении. Например, ледник Экологический ориентирован на восток (Bintanja, 1995), ледник Фурград — на юг (Falk et al., 2018), ледник Ланге — на юго-восток (Mojica-Moncada et al., 2021), в то время как наблюдения на куполе Беллинсгаузен позволили оценить динамику высоты границы питания на склонах и западной, и южной, и восточной экспозиций. Вместе с тем обособленное положение купола, открытого для ветров всех направлений, позволяло получить более полные данные, чем наблюдения на других ледниках.

Полученные средние данные ELA мы сравнивали со средней летней температурой за XII–II и XII–III месяцы по метеостанции Беллинсгаузен, расположенной на высоте 16 м на одноимённой антарктической станции и находящейся в 3.5 км к западу-юго-западу от края ледникового купола. Зимние осадки в расчёт не принимались, так как

они мало изменяются год от года (Сводные... — Электронный ресурс).

Для ледникового купола Беллинсгаузен характерно ежегодное накопление наложенного льда в основании снежного покрова (Мавлюдов, 2022а). После стаивания снега наложенный лёд также тает. Однако при неполном стаивании снега мощность наложенного льда каждый год увеличивается. В 2012–2016 гг. и позже для ледникового купола Беллинсгаузен при положительном балансе массы на отдельных участках было характерно накопление наложенного льда под нестаивающим снежным покровом. Поскольку высота границы питания проводится по нижней границе распространения однолетнего наложенного льда, а в многолетней толще однородного наложенного льда невозможно вычленить слой наложенного льда конкретного года, то проведение границы ЕЛА на куполе в эти годы в некоторых случаях вызывает затруднение. Однако речные наблюдения позволяют преодолеть эти трудности, чего нельзя сказать о дистанционных наблюдениях (Мавлюдов, 2022б). Поэтому для выяснения положения высоты границы питания на ледниковом куполе Беллинсгаузен предпочтительны именно речные наблюдения.

МЕСТО НАБЛЮДЕНИЙ

Ледниковый купол Беллинсгаузен (прежние названия: купол А, Малый купол, купол Коллинз) имеет округлую форму с диаметром 3.5–4.5 км, площадью открытой ледяной поверхности около 9 км² и высотой 250 м над ур. моря (рис. 1). Ледниковый купол по большей части своего периметра окружён мореной с ледяным ядром, внешняя граница которой служит границей ледникового купола. Ледниковый купол повсеместно заканчивается на суше на высотах от 0 до 50 м над ур. моря. Склоны купола пологие и чаще всего не превышают 10° за исключением нижней части купола на восточном склоне, где наклон склона достигает 20°, местами переходя в обрыв. В северо-восточной части по перешейку высотой около 230 м над ур. моря купол примыкает к ледниковому куполу Арктовский, высота которого превышает 700 м над ур. моря.

Климат на острове Кинг-Джордж морской с теплой зимой (со средней месячной температурой –5°С) и прохладным летом (до 2–4°С). Преобладают ветра СЗ- и ЮВ-направлений (Сводные... — Электронный ресурс).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения баланса массы по отдельным рейкам позволили собрать данные относительно положения ЕЛА на разных склонах ледникового купола (таблица). Поскольку в 2021/22 г. наблюде-

ния на ледниковом куполе проводились только в течение февраля, реальных значений высоты границы питания получить не удалось. Приведённые в таблице сведения за этот год приблизительны и в дальнейших построениях не используются. Значения ЕЛА для 2020 и 2023 гг. расположены выше верхней границы купола, равной 250 м. Это означает, что в эти летние сезоны вся поверхность ледникового купола находилась в области абляции.

Анализ данных, приведённых в табл. 1, показывает, что ЕЛА на ледниковом куполе Беллинсгаузен действительно подвержена сильным межгодовым колебаниям: она опускается к подножию ледникового купола в годы с положительным балансом массы и поднимается к вершине ледникового купола или выше неё в годы с отрицательным балансом массы. В среднем многолетнее положение высоты границы питания отмечено в верхней части ледникового купола на высоте около 190 м. Это положение ЕЛА одинаково почти на всех склонах ледникового купола, за исключением восточного склона, где высота границы питания находится на высоте около 170 м из-за приуроченности ветровых надувов к этим частям ледникового купола.

Кроме межгодовых колебаний положения ЕЛА наблюдаются её высотные колебания и на разных склонах ледникового купола. В годы с положительным и отрицательным балансом массы самое низкое положение высоты границы питания тяготеет к восточным склонам ледникового купола, что говорит о преобладании в зимнее время западных и северо-западных ветров. Однако в 2009/10 г. при положительном балансе массы низкое положение ЕЛА тяготело к западным склонам из-за преобладания зимнего переноса снега юго-восточными ветрами.

Сравнение положения среднего значения высоты границы питания с годовым балансом массы на ледниковом куполе показано на рис. 2, а. Отмечается неплохая связь этих параметров (коэффициент детерминации равен 0.78), поскольку хорошо видно, что при положительном балансе массы ЕЛА опускается, а при отрицательном балансе массы — поднимается.

Сравнение вычисленных по всем профилям средних значений высоты границы питания в каждый год измерений с ЕЛА каждого отдельного профиля тех же лет для всего периода наблюдений показало очень высокий коэффициент детерминации (0.8–0.9). Это означает, что по полученным зависимостям для каждого отдельного склона купола с большой степенью достоверности можно вычислить среднее значение высоты границы питания для всех склонов, то есть для всего ледникового купола за длительные периоды времени.

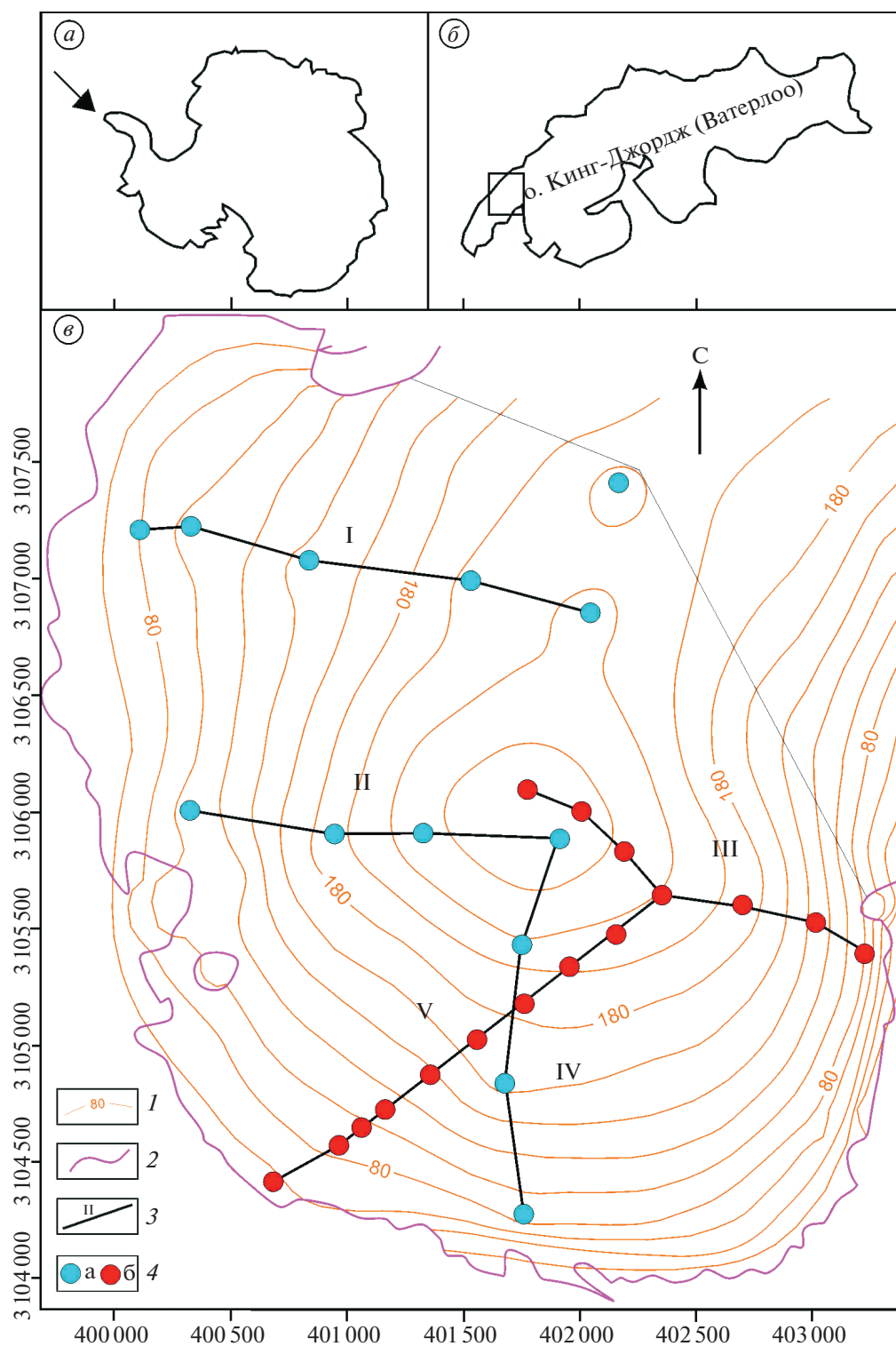


Рис. 1. Ледниковый купол Беллинсгаузен. (а) – Положение о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), указано стрелкой; (б) – остров Кинг-Джордж (Ватерлоо) (положение рисунка (в) показано квадратом); (в) – положение профилей измерения баланса массы на куполе: 1 – горизонталы на поверхности купола, 2 – край купола, 3 – профили и их номера, 4 – положение реек наблюдений (а – те, что дублируют немецкие рейки, б – установлены нами. Система координат UTM, 23 зона).

Fig. 1. Bellingshausen Ice Dome: (а) – Position of King George (Waterloo) Island, shown by arrow; (б) – King George (Waterloo) Island (position of sector (в) shown by square); (в) – position of profiles of mass balance measurements: 1 – contour lines on Ice Dome surface, 2 – edge of Ice Dome, 3 – profiles and their numbers, 4 – position of observation stakes (а – those that duplicate German stakes, б – installed by us. Coordinate system is UTM, 23 zone).

Таблица 1. Положение высоты границы питания на разных склонах ледникового купола Беллинсгаузен (расчёт по уравнениям регрессии для точек измерений баланса массы в профилях)

Год	Баланс массы Вп, см вэ	Средняя летняя температура XII–II, °С	Высота границы питания, м над ур. моря	Высота границы питания, м над ур. моря, на склонах (№ профиля)				
				запад-1 (ii)	запад-2 (i)	юго-запад (v)	юг (iv)	восток (iii)
2006		1.7	250					
2007		1.6	250					
2008	–15.5	1.4	217	245	220	200	218	200
2009	–84.9	1.6	232	265*	232	207	251*	207
2010	29.8	0.3	49	40	40	43	2	120
2011	–45.3	1.1	232	250	257*	197	251*	205
2012	–48.3	1.1	228	247	246	202	232	211
2013	–	–0.2	172	100	198	180	186	198
2014	–	–0.5	32	30	30	40	20	40
2015	4.6	0.6	46	40	30	100	40	20
2016	9.4	0.13	113	30	180	138	196	20
2017	–43.4	1.3	238	250	279*	205	251*	204
2018	–56.1	1.4	229	250	250	197	250	200
2019	1.8	0.6	143	155	170	179	104	105
2020	–152.9	1.9	338*	442*	285*	284*	325*	356*
2021	–65.4	1.4	230	248	247	203	243	210
2022	–	1.6	195	210	240	190	225	110
2023	–124.5	1.9	260*	264*	282*	210	274*	242
Среднее			192	192	199	173	192	166

*Высота границы питания, полученная по расчётам.

Поскольку зимние осадки мало изменяются во времени в этой части о. Кинг-Джордж (Сводные... – Электронный ресурс), основным фактором влияния климата на положение ELA оказывается температура воздуха. Проанализировав

связь высоты границы питания со средней летней температурой воздуха на метеостанции Беллинсгаузен за три (XII–II) и четыре (XII–III) месяца, а также с суммой средних месячных температур за те же периоды, с суммой средних месяч-

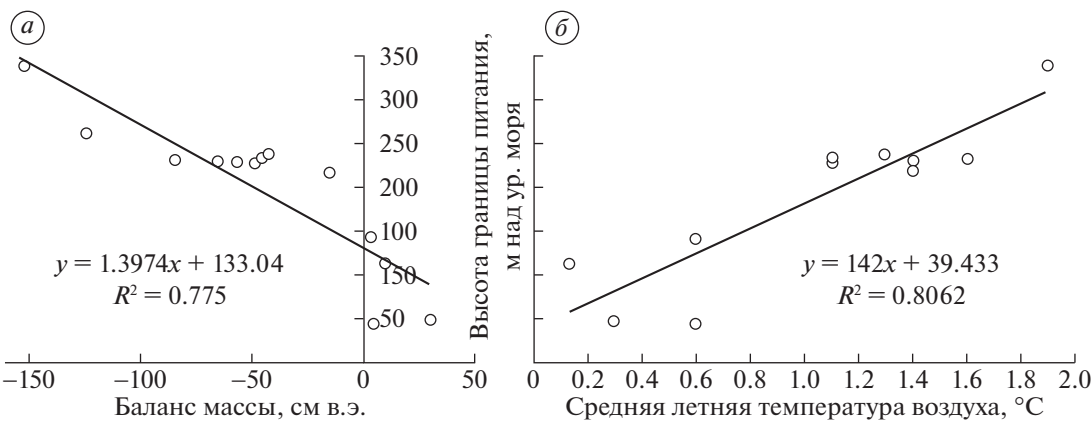


Рис. 2. Связь высоты границы питания с годовым балансом массы на ледниковом куполе Беллинсгаузен (а); связь высоты границы питания и средней летней температуры (XII–II) на метеостанции Беллинсгаузен (б).
Fig. 2. Relationship of ELA with annual mass balance at the Bellingshausen Ice Dome (а); Relationship between ELA and mean summer temperature (XII–II) at the Bellingshausen weather station (б).

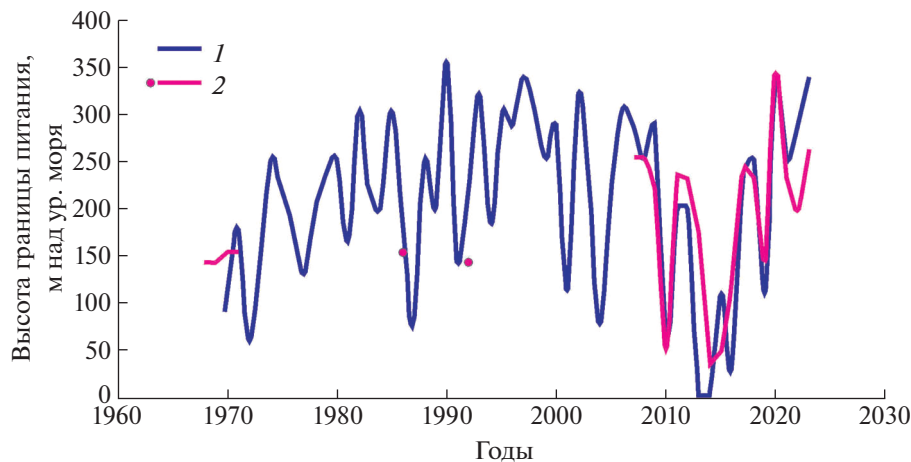


Рис. 3. Изменение высоты границы питания во времени за период наблюдений: 1 — расчёт значений высоты границы питания по средней летней температуре воздуха на метеостанции Беллинсгаузен, 2 — данные наблюдений высоты границы питания.

Fig. 3. Change of ELA for the investigation period: 1 — estimated ELA on the base of mean summer temperature on Bellingshausen weather station, 2 — measured ELA.

ных температур выше нуля и суммой средних суточных температур выше нуля, приходим к выводу, что наилучшей оказывается связь ELA со средней летней температурой воздуха на метеостанции Беллинсгаузен за три (XII–II) месяца. При этом коэффициент достоверности для всех лет наблюдений с 2007 по 2021 г. составил 0.81 при исключении лет с отсутствием наблюдений в 2012/13 и 2013/14 гг. (см. рис. 2, б). Тот же коэффициент достоверности при добавлении 2022/23 г. равен 0.79. Достаточно хорошая связь этих параметров позволяет восстановить высоту границы питания за весь период наблюдений на метеостанции Беллинсгаузен, т.е. с 1968 г., на основе расчёта средней летней температуры воздуха на метеостанции Беллинсгаузен за три (XII–II) месяца для всего периода наблюдений и применения полученной формулы: для 2007–2021 гг.: $T = 0.0057 \times \text{ELA} - 0.0167$; или с учётом 2023 г.: $T = 0.006 \times \text{ELA} - 0.0466$, где T — средняя летняя температура за декабрь–февраль, °C; ELA, м над ур. моря. Отсюда $\text{ELA} = (0.0167 + T)/0.0057$, или $\text{ELA} = (0.0466 + T)/0.006$.

В результате получим кривую изменения высоты границы питания во времени. Обе полученные кривые почти совпадают. Однако по первой формуле повышение или понижение средней летней температуры на 1°C приводит к изменению ELA на 175 м, а по второй — на 166 м. В дальнейшем была использована первая формула из-за большего коэффициента достоверности. Полученные значения изменения высоты границы питания сравнимы с данными, найденными для северной части Антарктического полуострова (Davies et al., 2012). Следует оговориться, что для 2013 и 2014 гг. по этой формуле получены отрица-

тельные значения ELA, чего в действительности быть не может. Поэтому значения высоты границы питания в это время были приравнены к нулю (рис. 3). О том, что снег на куполе Беллинсгаузен в эти годы таял лишь частично, свидетельствуют прямые наблюдения, выполненные, в частности, летом 2013/14 г. (устное сообщение Р.А. Чернова).

На этот же график были вынесены точки единичных измерений ELA в годы, когда на куполе проводились наблюдения. Неполное совпадение точек наблюдений с полученной кривой может быть связано с тем, что на графике показана осреднённая высота границы питания по всем склонам ледникового купола, в то время как единичные измерения соответствовали только одному из склонов купола — чаще всего, западному (Braun, 2001) или юго-западному (Wen et al., 1998).

Полученная кривая демонстрирует сильную изменчивость ELA во времени (см. рис. 3), а её сравнение с данными разрозненных полевых наблюдений показывает близость значений. Анализ кривых расчётного и особенно осреднённого значений ELA говорит о том, что никакой стабилизации ледникового купола за весь период наблюдений не происходило. Напротив, до середины 1980-х годов граница питания повышалась, и эта тенденция продолжалась примерно до 1998 г., хотя и в меньших размерах. В дальнейшем вплоть до 2003 г. ELA понижалась, а затем наблюдалось её небольшое повышение до 2008 г., а затем резкое понижение вплоть до 2015 г. В последующие годы граница питания продолжает повышаться вплоть до настоящего времени. Согласно осреднённым данным, в период с 1994 по 2000 г. и в 2010 г. ELA располагалась выше ледникового купола Беллинсгаузен.

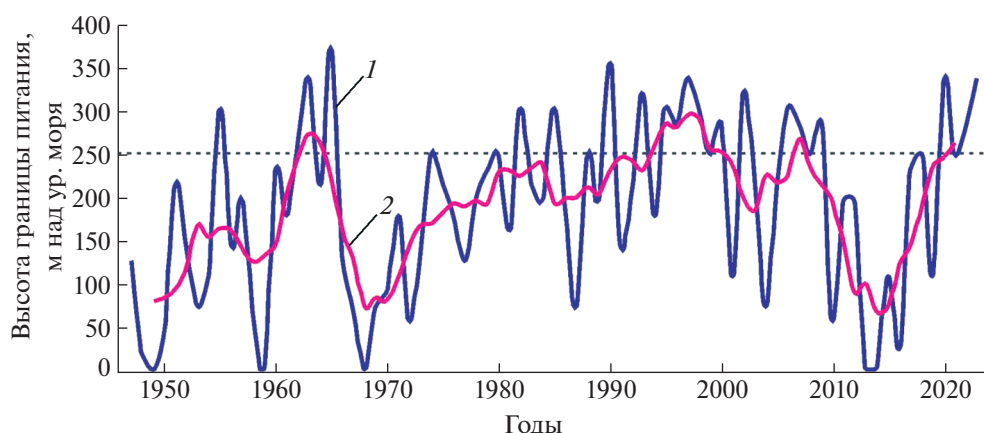


Рис. 4. Высота границы питания расчетная (1) и скользящие средние значения высоты границы питания с 5-летним шагом (2) за годы инструментальных наблюдений. Расчёт по уравнениям регрессии для точек измерений баланса массы в профилях. Пунктиром показана высота ледникового купола.

Fig. 4. Estimated ELA (1) and moving average ELA value with 5 years step (2) for tool period of investigations. Calculation using regression equations for mass balance measurement points in profiles. The dotted line shows the height of Ice Dome.

Согласно работам (Ferron et al., 2004; Kenya et al., 2013), различия между температурами воздуха на станциях Беллинсгаузен и Десепшен отсутствуют. Поэтому мы использовали данные наблюдений на метеостанции Десепшен для продолжения температурного ряда метеостанции Беллинсгаузен, что позволило рассчитать положение высоты границы питания здесь с 1947 г. (рис. 4). Анализ полученной кривой показывает, что в течение всего периода имеющихся инструментальных данных высота границы питания неоднократно превышала высоту купола Беллинсгаузен. Это происходило в 1955, 1962 и 1963 гг., а также неоднократно с 1982 по 2002 г., в 2020, 2022 и 2023 гг. В целом повышение границы питания отмечается с 1947 по 1955 г., далее она опускается почти до уровня моря в 1959 г., а затем повышается до максимума в 1963 г. и снова опускается до нуля в 1968 г., после чего следует длительное повышение до 1997 г., затем слабое понижение до 2008 г., резкое опускание в 2013/14 г. и последующее её повышение. На кривой видны как резкие и плавные повышения значений ELA, так и плавные и резкие понижения. В целом каких-либо общих закономерностей выявить не удаётся. И хотя в последние годы наметилась тенденция повышения высоты границы питания, невозможно предсказать её изменений в будущем.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамика высоты границы питания отражает состояние ледникового купола во времени. Если мы посмотрим на единичные данные ELA с 1968 по 1992 г., то покажется, что состояние ледникового купола было стабильным (Wen et al., 1994). Это же отмечалось и в работе (Falk et al., 2018).

Однако полученная кривая высоты границы питания показывает, что это был период её общего повышения, что нашло отражение в существенном уменьшении накопления фирна в верхней части ледникового купола. Если в 1968–1971 гг. величина фирнового слоя на вершине купола достигала 20 м (Orheim, Govorukha, 1983), то уже в начале 1990-х годов толщина фирнового слоя здесь сократилась до 7 м (Wen et al., 1994), а к 2007 г. этот слой полностью исчез (наши наблюдения). Примерно тогда же на ледниковом куполе метаморфический тип льдообразования сменился на конжеляционный (Мавлюдов, 2022a).

Многолетний характер изменения положения ELA на склонах ледникового купола не показывает общей тенденции повышения высоты границы питания во времени. Напротив, отмечаются отдельные периоды изменения положения ELA как в сторону повышения, так и понижения. Выявленные периоды имеют разную протяжённость (около 20 и 45 лет) и не дают никаких оснований строить какие-либо прогнозы. Подобные периоды изменения характера питания ледникового купола Беллинсгаузен имели место и в прошлом, о чём можно судить по имеющимся несогласиям залегания слоёв льда на склонах ледникового купола, которые наиболее отчётливо видны в западной части ледникового купола. Эти несогласия свидетельствуют о том, что в истории купола в зависимости от положения ELA периоды накопления массы льда сменялись преобладанием её расхода, и наоборот, когда накопление массы льда происходило не только в вершинной части ледникового купола, но и на его склонах вплоть до береговой черты. Такие чередования подъёма и опускания высоты границы питания, вероятно, происходили по крайней мере с начала малого

ледникового периода, поскольку ранее ледниковый купол Беллинсгаузен сильно сокращался в размерах или даже полностью исчезал (Веркулич и др., 2012).

Склоны ледникового купола Беллинсгаузен ориентированы почти на все стороны света, в то время как другие ледники острова, на которых проводятся многолетние наблюдения, имеют довольно чёткую ориентацию в одном направлении. Отсюда следует, что правильнее сравнивать высоты границы питания разных ледников со склоном ледникового купола той же ориентации, что и у сравниваемого ледника. Например, ледник Фургад на ледниковом куполе Варшава ориентирован на юго-запад и его правильнее сравнивать с ЕЛА юго-западного склона купола Беллинсгаузен. Ледник Экологический на куполе Варшава ориентирован на восток и его следует сравнивать с высотой границы питания восточного склона купола Беллинсгаузен. К сожалению, отсутствие длительных рядов непрерывных наблюдений на этих ледниках не позволяет провести качественное сравнение ЕЛА в парах ледников. Использование дистанционных данных для восстановления высоты границы питания на ледниках острова в большинстве случаев затруднительно, поскольку на этой территории преобладает облачная погода (в среднем 22 дня в каждом месяце небо покрыто облаками). Кроме того, положение ЕЛА могут маскировать частые снегопады в конце лета (Davies et al., 2012). Поэтому приходится ограничиться небольшими временными отрезками для возможного сравнения.

Для ледника Фургад имеется пятилетний ряд наблюдений — с 2011 по 2015 г. (Falk et al., 2018). Сравнение полученных положений высоты границы питания для обоих ледников показано на рис. 5. Как видно из этого рисунка, положение высоты границы питания в один и тот же период времени сильно различается, хотя сравниваются одинаково ориентированные склоны. На куполе Беллинсгаузен ЕЛА находится ниже, а на леднике Фургад — выше. При этом амплитуда изменения высоты границы питания за пятилетний срок на леднике Фургад не превышает 20 м, в то время как на куполе Беллинсгаузен амплитуда колебаний ЕЛА превышает 160 м. Однако характер изменения кривых высоты границы питания на обоих ледниках совпадают по знаку. Это означает, что оба ледника в некоторых случаях похожим образом, хотя и с разной интенсивностью, реагируют на колебания климата. Поскольку положение ЕЛА зависит от количества зимних осадков и температуры воздуха, а температура воздуха мало меняется в пределах одного острова, то, вероятнее всего, разница в положении высоты границы питания может быть связана с зимними осадками. Но и сумма осадков на одном острове, скорее всего, почти одинакова, а разница в снегоотложе-

нии может быть связана с ветровым переносом осадков. Можно полагать, что по этой причине на леднике Фургад сдувание снега могло привести к более высокому положению ЕЛА по сравнению с куполом Беллинсгаузен. Подобное ветровое перераспределение могло вызвать и более плавные межгодовые изменения высоты границы питания.

К сожалению, определения ЕЛА для ледников в заливе Адмиралти, ориентированных на восток, единичны и не позволяют провести сравнение с высотой границы питания купола Беллинсгаузен (Pasik et al., 2021). Можно сказать лишь, что ЕЛА для этих ледников расположены ниже, чем на куполе Беллинсгаузен. Например, на Экологическом леднике в 2013 г. высота границы питания располагалась на высоте 156 м, на леднике Феникс — на 140 м, а леднике Барановского — на высоте 150 м, в то время как на восточном склоне купола Беллинсгаузен в 2013 г. ЕЛА находилась на уровне 180 м. Подобные различия, очевидно, также определяются особенностями ветрового перераспределения снега на этих ледниках.

Как отмечено выше, температуры воздуха на островах Кинг-Джордж и Десепшен близки (Ferguson et al., 2004). Это позволяет отнести подобное предположение и к другим частям Южных Шетландских островов. Можно ожидать, что и ход изменений положения ЕЛА происходит на архипелаге сходным образом. Действительно, соотношения изменений высоты границы питания на куполе Беллинсгаузен и на леднике Херд на о. Ливингстон (Sancho et al., 2017) схожи и по синхронности изменений, и по величине (см. рис. 5), что может подтвердить возможное подобие изменений ЕЛА в пределах архипелага Южных Шетландских островов.

Сравнение положения высоты границы питания на куполе Беллинсгаузен и на ледниках, расположенных к востоку от Антарктического полуострова (см. рис. 5), показывает как некоторую схожесть, так и различия. При этом наибольшая схожесть отмечается с ледниковым куполом Дэвис и меньшая — с ледником Виски (Engel et al., 2018). Схожесть изменений ЕЛА в виде синхронности изменения на куполе Беллинсгаузен и ледниках на востоке Антарктического полуострова и особенно на леднике Херд на о. Ливингстон оказалась даже выше, чем с ледником Фургад, расположенном на том же острове. Можно предположить, что отмеченная схожесть изменения высоты границ питания на архипелаге и Антарктическом полуострове связана с преобладанием западных ветров в регионе. Вероятно, именно поэтому отмечается синхронность изменения баланса массы на ледниках Южных Шетландских островов и Антарктического полуострова (Engel et al., 2018), что также проявляется и в некоторой

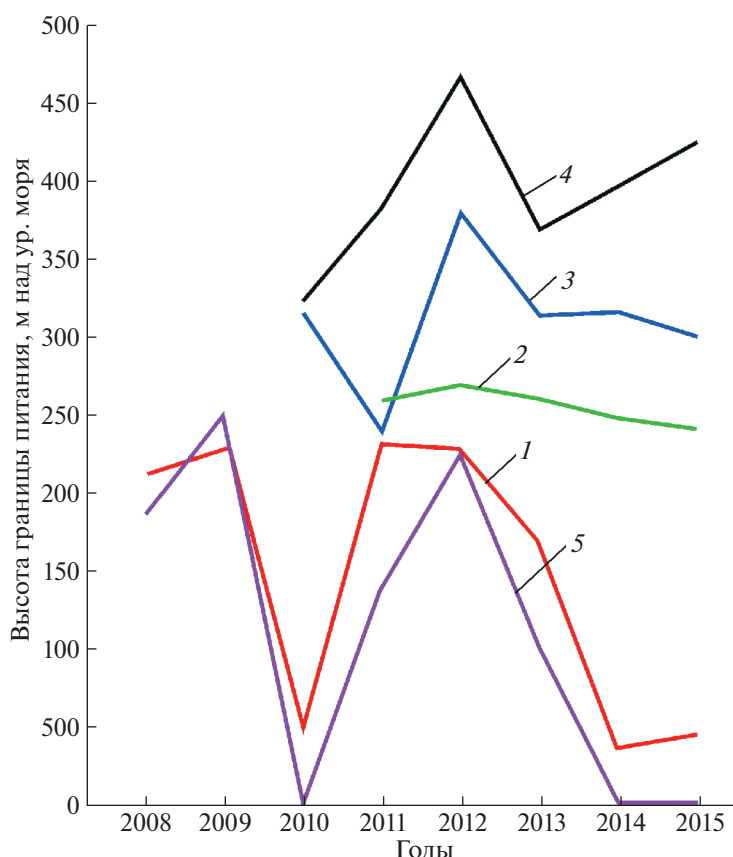


Рис. 5. Изменение положения высоты границы питания в 2008–2015 гг.: 1 – купол Беллинсгаузен, 2 – ледник Фуркад (Falk et al., 2018), 3 – ледник Виски, 4 – купол Дэвис (Engel et al., 2018), 5 – ледник Херд (Sancho et al., 2017).

Fig. 5. Change of ELA position in 2008–2015: 1 – Bellingshausen Ice Dome, 2 – Fourcade Glacier (Falk et al., 2018), 3 – Whisky Glacier, 4 – Davies Dome (Engel et al., 2018), 5 – Hurd Glacier (Sancho et al., 2017).

схожести в синхронности изменений ELA ледников этих регионов.

Даже на близко расположенных ледниках одного острова высота границы питания может принимать разные значения. Это видно не только на примере о. Кинг-Джордж, но и в северной части Антарктического полуострова (рис. 6). Столь большое разнообразие положений ELA на полуострове Тринити связано с сильным градиентом осадков с востока на запад, в результате чего снеговая линия на западном берегу опускается почти до уровня моря, в то время как на восточном она расположена на высоте 300–400 м над ур. моря (Davies et al., 2012). Важно также и перераспределение снега сильными ветрами.

В отличие от ситуации на полуострове Тринити, где речь идёт о нескольких ледниках на разных склонах полуострова, на куполах Беллинсгаузен и Варшава на о. Кинг-Джордж наблюдается обратная картина: на восточных частях куполов высота границы питания расположена ниже, чем на западных. Это может быть связано со сдуванием снега преобладающими западными и северо-за-

падными ветрами с вершинных частей куполов на их восточные склоны.

В работе (Kaplan et al., 2020) было выяснено, что и сокращение, и увеличение размеров ледников в Патагонии, на западе и на востоке Антарктического полуострова в течение голоцена происходили синхронно – когда создавались условия постоянного положительного и отрицательного индекса Южного кольцевого режима (SAM – Southern Annular Mode) соответственно. Поскольку изменения ледников в целом происходили синхронно, можно предположить, что колебания положения высоты границы питания на сходных ледниках этих регионов также могли происходить синхронно. И только дальнейшие исследования смогут показать, насколько верна эта гипотеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные о положении высоты границы питания, полученные при обработке материалов по балансу массы на профильных точках ледниково-

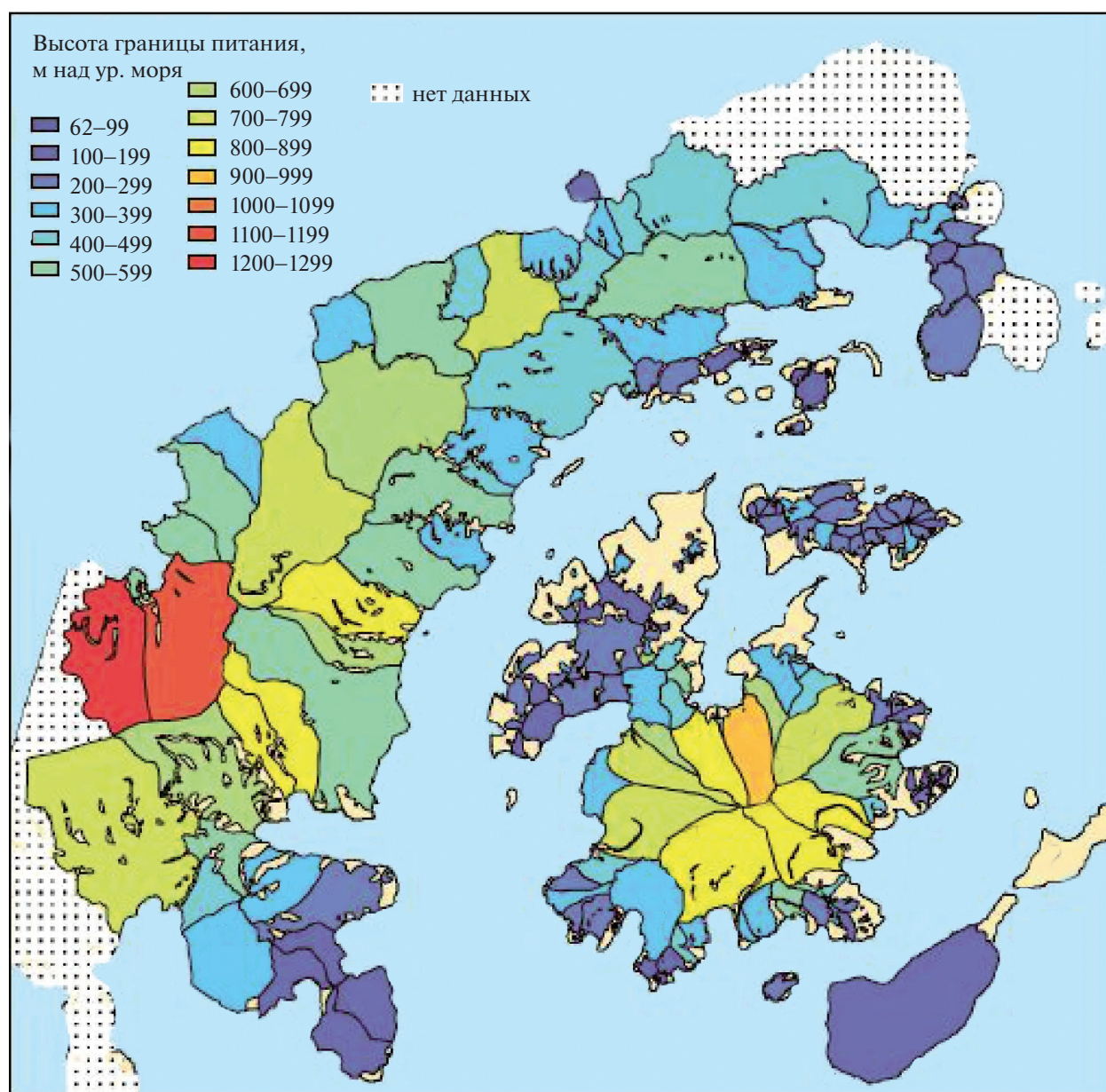


Рис. 6. Расчётная высота границы питания для северной части Антарктического полуострова в 2006 г., м (Davies et al., 2012).

Fig. 6. Calculated ELA for northern part of Antarctic Peninsular in 2016, m (Davies, et al., 2012).

го купола Беллинсгаузен для каждого года наблюдений, выявили хорошую связь ELA и средней летней температуры на метеостанции Беллинсгаузен за летние месяцы Южного полушария (коэффициент детерминации около 0.8). Полагая полученную связь стабильной и в прошлом, удалось восстановить положение ELA на куполе Беллинсгаузен на весь период наблюдений (начиная с 1947 г.). Несмотря на сильные межгодовые изменения, осреднение по пятилетним срокам показало, что имеется два периода изменения положения высоты границы питания разной про-

должительности: около 20 лет (1947–1968 гг.) и около 45 лет (1968–2013 гг.). Третий период начался в 2015 г. и продолжается до настоящего времени. Является ли настоящий этап изменения высоты границы питания третьим периодом и какова будет его продолжительность, могут показать будущие наблюдения. В каждом из выделенных периодов положение ELA на максимуме оказывалось выше высоты ледникового купола Беллинсгаузен, т.е. в эти годы ледниковый купол полностью терял область аккумуляции.

Анализ имеющихся данных показывает сильную изменчивость положения высоты границы питания на о. Кинг-Джордж. На западных, юго-западных и южных склонах как небольшого ледникового купола Беллинсгаузен, так и более крупного ледникового купола Варшава ЕЛА расположена выше, чем на восточных и юго-восточных склонах. Является ли это закономерностью для всего острова и, возможно, всех Южных Шетландских островов, предстоит выяснить в будущем.

Поскольку колебания высоты границы питания на ледниковом куполе Беллинсгаузен на о. Кинг-Джордж (Ватерлоо) и на леднике Херд на о. Ливингстон (Смоленск) происходят сходно по синхронности изменений и по величине, это может свидетельствовать о возможной синхронности изменения ЕЛА на всех Южных Шетландских островах в целом. Можно предполагать, что общие закономерности изменения положения ЕЛА, полученные для ледникового купола Беллинсгаузен, с определённой долей вероятности могут быть использованы для восстановления положения границы питания не только на всём острове Кинг-Джордж, но и, с определённой долей вероятности, на других ледниках архипелага. Такая проверка окажется возможной по мере того, как появятся длительные ряды наблюдений за балансом массы на других островах архипелага.

Благодарности. Автор приносит благодарность РАЭ за предоставленную возможность работы в Антарктике на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо). Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) “Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата” и при частичной поддержке межрегионального проекта МАГАТЭ INT5156.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to Russian Antarctic Expedition for the given possibility of work in Antarctic on King George (Waterloo). The work was carried out within the framework of the state assignment № 0148-2019-0004 (АААА-А19-119022190172-5) “Glaciation and accompanying natural processes at climate changes” and at partial support of inter-regional project INT5156 of IAEA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веркулич С.Р., Пушина З.В., Татур А., Дорожкина М.В., Сухомлинов Д.И., Курбатова Л.Е., Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л.М. Голоценовые изменения природной среды на полуострове Файлдс, остров Кинг-Джордж (Западная Антарктика) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3 (93). С. 17–28.
- Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л.: ГИМИЗ. 1984, 528 с.
- Заморуев В.В. Результаты гляциологических наблюдений на станции Беллинсгаузен в 1968 г. // Тр. САЭ. 1972. Т. 55. С. 135–144.
- Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: ГИМИЗ, 1982. 288 с.
- Мавлюдов Б.Р. Баланс массы льда ледникового купола Беллинсгаузен в 2007–2012 гг. (о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика) // Лёд и Снег. 2014. № 1. С. 27–34.
- Мавлюдов Б.Р. Наложённый лед на куполе Беллинсгаузен (остров Кинг-Джордж, Антарктика) // Криосфера Земли. 2022а. Вып. XXVI. № 5. С. 56–70. <https://doi.org/10.15372/KZ20220505>
- Мавлюдов Б.Р. Летний баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен // Лёд и Снег. 2022б. Т. 62. № 3. С. 325–342. <https://doi.org/10.31857/S2076673422030135>
- Орлов А.И. Географические исследования на полуострове Файлдс // Тр. САЭ. 1973. Т. 58. С. 184–207.
- Сводные таблицы климатических метеорологических данных для антарктических станций РФ. Станция Беллинсгаузен (89050) // Электронный ресурс: <http://www.aari.aq/data/data.php?lang=1&station=0#ttt.txt> (Дата обращения 25.04.2022).
- Atle N. Topographical Effects on the Equilibrium-Line Altitude on Glaciers // Geo Journ. 1992. 27 (4). P. 383–391.
- Bintanja R. The local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modeling // Antarctic Science. 1995. № 7. P. 315–325. <https://doi.org/10.1017/S0954102095000435>
- Braithwaite R.J., Muller F. On the parameterization of glacier equilibrium line altitude // World Glacier Inventory. Proc. of the Riederalp Workshop, September 1978. IAHS-AISH Publ. 1980. № 126. P. 263–271.
- Braun M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica) – an approach from field measurements, modelling and remote sensing. Doctoral thesis at the Faculty of Earth Sciences Albert–Ludwigs–Universität Freiburg i. Br., Riedlingen/Württ. 2001. 165 p.
- Davies B.J., Carrivick J.L., Glasser N.F., Hambrey M.J., Smellie J.L. Variable glacier response to atmospheric warming, Northern Antarctic Peninsula, 1988–2009 // The Cryosphere. 2012. № 6. P. 1031–1048. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1031-2012>
- Dziembowski M., Bialik R.J. The Remotely and Directly Obtained Results of Glaciological Studies on King George Island: A Review // Remote Sensing. 2022. V. 14. 2736. <https://doi.org/10.3390/rs14122736>
- Engel Z., Láská K., Nývlt D., Stachoň Z. Surface mass balance of small glaciers on James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula, during 2009–2015. Journ. of Glaciology. 2018. 64 (245). P. 349–361. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.17>
- Ferron F.A., Simões J.C., Aquino F.E., Setzer A.W. Air temperature time series for King George Island, Antarctica // Pesquisa Antártica Brasileira (Brazilian Antarctic Research). 2004. № 4. P. 155–169.
- Falk U., López D.A., Silva-Busso A. Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modeling and equilibrium line altitude on King George Island, Antarctic Peninsula // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 1211–1232. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1211-2018>

- Kaplan M.R., Strelin J.A., Schaefer J.M., Peltier C., Martini M.A., Flores E., Winckler G., Schwartz R. Holocene glacier behavior around the northern Antarctic Peninsula and possible causes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. 534. 116077. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116077>
- Kenya M., Arażny A., Sobota I. Climatic change on King George Island in the years 1948–2011 // *Polish Polar Research*. 2013. V. 34. № 2. P. 213–235.
- Kuhle M. Topography as a fundamental element of glacial systems. A new approach to ELA calculation and typological classification of paleo- and recent glaciations // *Geo Journ.* 1988. V. 17. № 4. P. 545–568.
- Mojica-Moncada D.F., Cárdenas C., Mojica-Moncada J.F., Brondi F., Barragán-Barrera D.C., Marangunic C., Holland D., Herrera A.F., Casassa G. Study of the Lange Glacier and its impact due to temperature increase in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica // *Bulletin of Marine and Coastal Research*. 2021. № 50 P. 59–84.
- Ohmura A., Boettcher M. On the shift of glacier equilibrium line altitude (ELA) under the changing climate // *Water*. 2022. V. 14. P. 2821. <https://doi.org/10.3390/w14182821>
- Orheim O., Govorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands // *Annals of Glaciology*. 1983. № 3. P. 233–238.
- Pasik M., Bakuła K., Różycki S., Ostrowski W., Kowalska M.E., Fijałkowska A., Rajner M., Łapiński S., Sobota I., Kejna M., Osińska-Skotak K. Glacier geometry changes in the western shore of Admiralty Bay, King George Island over the last decades // *Sensors*. 2021. V. 21. № 1532. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21041532>
- Sancho L.G., Pintado A., Navarro F., Ramos M., De Pablo M.A., Blanquer J.M., Raggio J., Valladares F., Green T.G.A. Recent warming and cooling in the Antarctic Peninsula region has rapid and large effects on lichen vegetation // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. № 5689. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05989-4>
- Wen J., Kang J., Xie Z., Han J., Lluberas A. Climate, mass balance and glacial changes on small dome of Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica // *Antarctic Research*. 1994. V. 5 (1). P. 52–61.
- Wen J., Kang J., Han J., Xie Z., Liu L., Wang D. Glaciological studies on King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 1998. V. 27. P. 105–109.

Citation: Mavlyudov B.R. Equilibrium line altitude on Bellingshausen Ice Dome, Antarctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 540–552 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040117

Equilibrium Line Altitude on Bellingshausen Ice Dome, Antarctic

B. R. Mavlyudov^{a, #}

^a*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: bulatrm@bk.ru*

Received June 9, 2023; revised September 15, 2023; accepted October 2, 2023

We present an analysis of the equilibrium line altitude (ELA) on the Bellingshausen Ice Dome on King George Island (Waterloo), Antarctica, derived only from ground-based glaciological surveys for the period 2007–2012 and 2014–2023. A good relationship was found between ELA and mean summer air temperature (XII–II months) with a coefficient of determination of about 0.8. Assuming the stability of this relation in the past, the changes in the ELA during the entire period of observations at Bellingshausen weather station (from 1968) were reconstructed. Since negative ELA values were obtained for some years, which is physically impossible, they were artificially adjusted to sea level. A good correlation of air temperature between the Bellingshausen and Deception Island weather stations allowed extending the reconstruction of ELA for a longer period (from 1947).

By cleaning up the strong interannual fluctuations in ELA using five-year moving averages, two complete periods of ELA change (from minimum to minimum) were identified for approximately 20 years (1947–1968) and 45 years (1968–2013). From 2014 to present time, the third period has been continuing. At the apogee of each period, the ELA was higher than the Bellingshausen Ice Dome height, which indicates that in these years the ice dome completely lost accumulation area. For the Bellingshausen and Warsaw ice domes, a pattern of higher ELA position on the western and southern slopes compared to the eastern slopes was revealed, which is probably applicable to the entire King George Island.

Since the ELA variations on King George Island are generally synchronous with its variations on Livingston Island, the reconstructed ELA on the Bellingshausen Ice Dome can probably be useful for reconstructing the glaciation history of the South Shetland Islands.

Keywords: ELA, Bellingshausen Ice Dome, mean summer air temperature

REFERENCES

- Verkulich S.R., Pushina Z.V., Tatur A., Dorozhkina M.V., Sukhomlinov D.I., Kurbatova L.E., Mavlyudov B.R., Savatugin L.M. Holocene changes of natural environment on Fildes Peninsular, King George Island (Western Antarctic). *Problemy Arctiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 3 (93): 17–28 [In Russian].
- Glyaciologicheskij slovar'. Glaciological dictionary. Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: State Publishing House of Hydrometeorological Literature. 1984, 528 p. [In Russian].
- Zamoruev V.V. Results of glaciological observations on Bellingshausen station. *Trudy Sovetskoy Antrkticheskoy Expeditsii*. Transactions of the Soviet Antarctic Expedition. 1972, 55: 135–144 [In Russian].
- Krenke A.N. Mass exchange in glacial systems on area of the USSR. Leningrad: State Publishing House of Hydrometeorological Literature, 1982: 288 p. [In Russian].
- Mavlyudov B.R. Ice mass balance of Bellingshausen Ice Dome in 2007–2012 (King George Island, Antarctic). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1: 27–34 [In Russian].
- Mavlyudov B.R. Superimposed ice on Bellingshausen Ice Dome (King George Island, Antarctic). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2022, 26 (5): 56–70 [In Russian]. <https://doi.org/10.15372/KZ20220505>
- Mavlyudov B.R. Summer mass balance of Bellingshausen Ice Dome. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (3): 325–342 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673422030135>
- Orlov A.I. Geographical investigations on the Fildes Peninsular. *Trudy Sovetskoy Antrkticheskoy Expeditsii*. Transactions of the Soviet Antarctic Expedition. 1973, 58: 184–207 [In Russian].
- Svodnye tablicy klimaticheskikh meteorologicheskikh daniy dlya antarkticheskikh stancij RF. Stanciya Bellingsgauzen (89050). Summary tables of climatic meteorological data for the Antarctic stations of the Russian Federation. Bellingshausen station (89050). Retrieved from: <http://www.aari.aq/data/data.php?lang=1&station=0#ttt.txt> (Last access: 25 April 2022) [In Russian].
- Atle N. Topographical Effects on the Equilibrium-Line Altitude on Glaciers. *Geo Journ*. 1992, 27 (4): 383–391.
- Bintanja R. The local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modeling. *Antarct. Sci*. 1995, 7: 315–325. <https://doi.org/10.1017/S0954102095000435>
- Braithwaite R.J., Muller F. On the parameterization of glacier equilibrium line altitude. *World Glacier Inventory*. Proc. of the Riederalp Workshop, September 1978. IAHS-AISH Publ. 1980, 126: 263–271.
- Braun M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica) – an approach from field measurements, modelling and remote sensing. Doctoral thesis at the Faculty of Earth Sciences Albert–Ludwigs–Universität Freiburg i. Br., Riedlingen/Württ. 2001: 165 p.
- Davies B.J., Carrivic J.L., Glasser N.F., Hambrey M.J., Smellie J.L. Variable glacier response to atmospheric warming, Northern Antarctic Peninsula, 1988–2009. *The Cryosphere*. 2012, 6: 1031–1048. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1031-2012>
- Dziembowski M., Bialik R.J. The remotely and directly obtained results of glaciological studies on King George Island: a review. *Remote Sensing*. 2022, 14: 2736. <https://doi.org/10.3390/rs14122736>
- Engel Z., Láská K., Nývlt D., Stachoň Z. Surface mass balance of small glaciers on James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula, during 2009–2015. *Journ. of Glaciology*. 2018, 64 (245): 349–361. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.17>
- Ferron F.A., Simões J.C., Aquino F.E., Setzer A.W. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira (Brazilian Antarctic Research)*. 2004, 4: 155–169.
- Falk U., López D.A., Silva-Busso A. Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modeling and equilibrium line altitude on King George Island, Antarctic Peninsula. *The Cryosphere*. 2018, 12: 1211–1232. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1211-2018>
- Kaplan M.R., Strelin J.A., Schaefer J.M., Peltier C., Martini M.A., Flores E., Winckler G., Schwartz R. Holocene glacier behavior around the northern Antarctic Peninsula and possible causes. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020, 534: 116077. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116077>
- Kenya M., Arażny A., Sobota I. Climatic change on King George Island in the years 1948–2011. *Polish Polar Research*. 2013, 34 (2): 213–235.
- Kuhle M. Topography as a fundamental element of glacial systems. A new approach to ELA calculation and typological classification of paleo- and recent glaciations. *Geo Journ*. 1988, 17 (4): 545–568.
- Mojica-Moncada D.F., Cárdenas C., Mojica-Moncada J.F., Brondi F., Barragán-Barrera D.C., Marangunic C., Holland D., Herrera A.F., Casassa G. Study of the Lange Glacier and its impact due to temperature increase in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Bulletin of Marine and Coastal Research*. 2021, 50: 59–84.
- Ohmura A., Boettcher M. On the shift of glacier equilibrium line altitude (ELA) under the changing climate. *Water*. 2022, 14: 2821. <https://doi.org/10.3390/w14182821>
- Orheim O., Govorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands. *Annals of Glaciology*. 1983, 3: 233–238.
- Pasik M., Bakuła K., Różycki S., Ostrowski W., Kowalska M.E., Fijałkowska A., Rajner M., Łapiński S., Sobota I., Kejna M., Osińska-Skotak K. Glacier geometry changes in the western shore of Admiralty Bay, King George Island over the last decades. *Sensors*. 2021, 21 (1532): 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21041532>
- Sancho L.G., Pintado A., Navarro F., Ramos M., De Pablo M.A., Blanquer J.M., Raggio J., Valladares F., Green T.G.A. Recent warming and cooling in the Antarctic Peninsula region has rapid and large effects on lichen vegetation. *Scientific Reports*. 2017, 7 (5689): 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05989-4>
- Wen J., Kang J., Xie Z., Han J., Lluberas A. Climate, mass balance and glacial changes on small dome of Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica. *Antarctic Research*. 1994, 5 (1): 52–61.
- Wen J., Kang J., Han J., Xie Z., Liu L., Wang D. Glaciological studies on King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1998, 27: 105–109.