

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.4

DOI: 10.31857/S2076673422030135, EDN: EPRTSB

Летний баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен на острове Кинг-Джордж, Антарктика

© 2022 г. Б.Р. Мавлюдов

Институт географии РАН, Москва, Россия
mavlyudov@igras.ru

Summer mass balance of the Bellingshausen Dome on King George Island, Antarctica

B.R. Mavlyudov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
mavlyudov@igras.ru

Received April 18, 2020 / Revised April 21, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *degree day factor, snow and ice melting, summer mass balance.*

Summary

For the first time the summer mass balance of the Bellingshausen Ice Cap, the King George Island (Waterloo) in Antarctica, was estimated for the period of summer seasons 2007–2012 and 2014–2020. Measurements were carried out over a network of 29 ablation stakes. The contribution to the summer mass balance on the dome includes melting of snow (77%), glacial ice (15%), and superimposed ice (8%). Altitude gradients of snow and ice melting on slopes of different exposition were determined, which changed from –1.5 mm of water equivalent (w.e.) per 1 m on western slope in years with annual positive ice mass balance to –11 mm w.e. per 1 m on southern slope in years with negative ice mass balance. The summer mass balance on the cap was calculated using: 1) the average summer air temperature; 2) the sum of positive daily temperatures from data of the Bellingshausen weather station, 3) sum of average monthly air temperatures. Based on a comparison of colder (2009/10) and warmer (2019/20) years, the average melting coefficient for snow and ice for the glacier was calculated to be 9.5 mm/°C per day (Day Degree Factor – DDF). The high value of the DDF is probably due to intensive summer condensation during periods of frequent foggy weather on King George Island. A good correlation was found between the summer mass balance on the cap and the average summer air temperature at the Bellingshausen weather station for December–March ($R^2 = 0.9$). This shows that the air temperature is the decisive factor of the change in the summer mass balance. Using this correlation, the dynamics of the summer mass balance on the cap was restored for the observation period (1969–2020), which approximately corresponds to the trends in the annual mass balance on the cap. According to observations, it was found that positive deviation of the average summer air temperature by 0.5 °C from its climatic average value (~1 °C) increases the summer mass balance by 56%, while its negative deviation by 0.5 °C decreases the summer mass balance by 36%. This demonstrates a very high sensitivity of the summer mass balance on the glacier cap to climate changes.

Citation: Mavlyudov B.R. Summer mass balance of the Bellingshausen Dome on King George Island, Antarctica. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (3): 325–342. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030135, edn: eprtsb.

Поступила 18 апреля 2020 г. / После доработки 21 апреля 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *летний баланс массы, таяние снега и льда, температурный коэффициент таяния.*

По данным полевых наблюдений на куполе Беллинсгаузен (Антарктика) в сезоны абляции 2007–2020 гг. даны оценки общего суммарного таяния, изменения таяния с высотой, определены также доля таяния снега, наложенного и ледникового льда, изменение плотности снега в течение периода абляции, вертикальные градиенты таяния снега и льда на склонах разной экспозиции и температурный коэффициент таяния. На основании полученных данных восстановлен летний баланс массы льда на куполе на период с 1968 по 2020 г. и прогноз изменения летнего баланса при изменении климата.

Принятые в статье сокращения

ВГТ – вертикальный градиент таяния

ВТГ – средний вертикальный температурный градиент

ЛБМ – летний баланс массы

ТКТ – температурный коэффициент таяния

Введение

Ледники Антарктического полуострова чутко реагируют на изменения климата в регионе. Если до конца XX в. здесь было отмечено значительное потепление климата, которое сопровождалось сокращением ледников, то в начале XXI в. для региона характерно небольшое понижение температуры воздуха, которое привело к изменению знака баланса массы некоторых ледников на протяжении ряда лет (Oliva et al., 2017).

Один из интересных объектов для изучения влияния изменения климата на ледники района Антарктического полуострова – остров Кинг-Джордж (Ватерлоо), который на 95% покрыт ледниковыми шапками (рис. 1, а). Понять, как ледники острова реагируют на изменения климата, помогает исследование их годового баланса массы. Баланс массы на острове изучается на трёх разных участках: 1) на выводных ледниках в районе залива Адмиралти (Szilo, Bialik, 2018; Pętlicki et al., 2017; Perondi, 2018; Pudełko et al., 2018; Pasik et al., 2021); 2) на выводном леднике Фургад около Аргентинской станции (Falk et al., 2018); 3) на небольшом ледниковом куполе Беллинсгаузен (неофициальное старое название купол Коллинз) (Jiahong et al., 1998; Говоруха, Симонов, 1973; Заморуев, 1972; Орлов, 1973); Orheim O., Govorukha, 1982; Braun, 2001; Мавлюдов, 2014, 2016; Rückamp et al., 2011; Rückamp, Blindow 2012). На всех выводных ледниках преобладает отрицательный годовой баланс массы. Положительный годовой баланс массы был отмечен только в 2013/14 г. (Pasik et al., 2021). На ледниковом куполе Беллинсгаузен (см. рис. 1, б) положительный годовой баланс массы зафиксирован в течение нескольких лет (Мавлюдов, 2016). Различия в годовом балансе массы в разных частях острова, видимо, связаны с ориентацией склонов ледников по отношению к господствующим ветрам. Если ледник Фургад ориентирован на юг, то исследованные ледники залива Адмиралти преимущественно имеют ориентацию на восток и юго-восток, в то время

как купол Беллинсгаузен открыт ветрам всех направлений, т.е. он не зависит от местных условий, а характеризует общее состояние оледенения на острове.

Рассмотрим баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен (см. рис. 1, б), расположенного в юго-западной части о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), Южные Шетландские острова (см. рис. 1, а). На нём проводили летние сезонные полевые работы в течение двух периодов: с 2007/08 по 2011/12 г. и с 2014/15 по 2019/20 г. Изменение баланса массы ледникового купола в значительной степени зависит от летнего баланса массы (ЛБМ), поскольку по данным метеостанции Беллинсгаузен количество выпавших зимних атмосферных осадков с 1968 г. имеет практически нулевой тренд (Электронный ресурс). Настоящая статья посвящена оценке летнего баланса массы на ледниковом куполе, что позволит понять общее состояние годового баланса массы на нём.

Район работ

Купол Беллинсгаузен представляет собой небольшую юго-западную часть системы взаимосвязанных ледниковых куполов (см. рис. 1, б), которые занимают около 95% территории о. Кинг-Джордж (координаты аэропорта о. Кинг-Джордж: 62°11'27" ю.ш., 58°59'03" з.д.). Площадь купола Беллинсгаузен составляет около 8,9 км², высота – от 0 до 250 м, размеры – 3 × 4,5 км. По всему периметру купол заканчивается на суше на высотах от 0 до 50 м над ур. моря. Климат на острове – морской, с прохладным летом (с 1968 по 2020 г. средняя многолетняя температура в декабре–марте составляла 0,94 °С) и не очень холодной зимой (средняя температура в апреле–ноябре –3,89 °С). Количество осадков в декабре–марте – 241,4 мм, в апреле–ноябре – 457,1 мм, преобладающие ветра летом с 3-СЗ, зимой – с ЮВ.

Первые исследования ледникового купола выполнены в 1968–1970 гг. (Говоруха, Симонов,

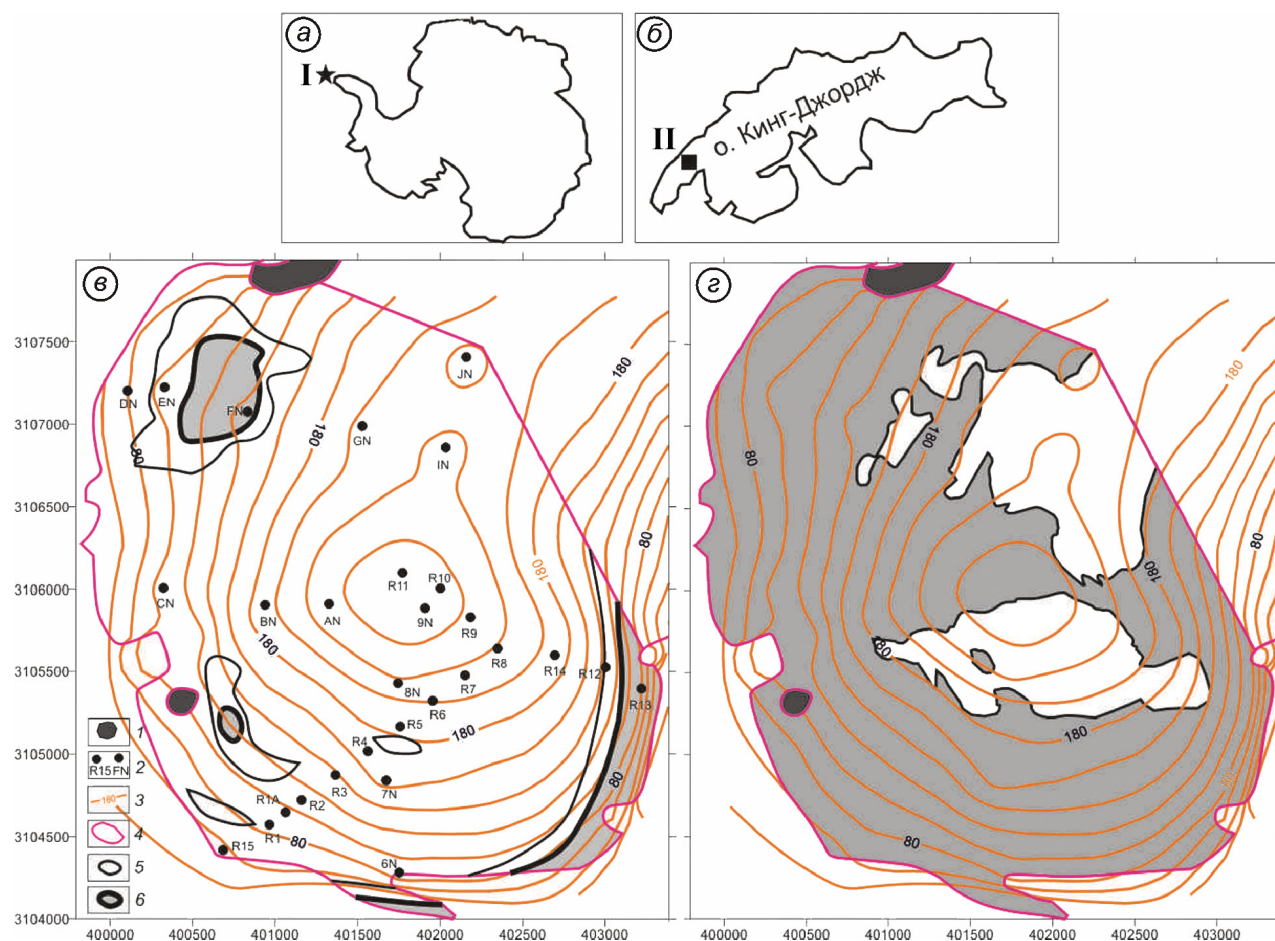


Рис. 1. Положение острова Кинг-Джордж (I) около Антарктического полуострова на карте Антарктиды (a) и ледникового купола Беллинсгаузен (II) на острове Кинг-Джордж (b). Положение абляционных реек на ледниковом куполе Беллинсгаузен, снеговая линия и высота границы питания на ледниковом куполе Беллинсгаузен в марте 2009/10 г. (c); фирновая линия и поле распространения фирна в марте 2019/20 г. (d).

1 – нунатаки; 2 – номера реек; 3 – горизонталы поверхности рельефа с высотой над уровнем моря; 4 – граница купола; 5 – снеговая линия (c) и фирновая линия (d); 6 – высота границы питания, оконтуривающая область абляции (c). Серый цвет – ледниковый лёд; белый цвет – снег и фирн. Система координат UTM (21 зона)

Fig. 1 Position of King George (Waterloo) Island (I) on Antarctic map (a) and of the Bellingshausen Ice Dome (II) on King George Island (b). Position of ablation stakes on Bellingshausen Ice Dome, snow line and equilibrium line altitude (ELA) on Bellingshausen Ice Dome at March 2009/10 (c); firn line and firn area distribution at March 2019/20 (d).

1 – nunataks; 2 – numbers of stakes; 3 – contour lines of relief surface; 4 – boundary of Ice Dome; 5 – snow line (c) and firn (d); 6 – ELA delineating ablation area (c). Grey color is glacier ice, white color – snow and firn. Coordinate system is UTM, 21 zone

1973; Заморуев, 1972; Орлов, 1973). Гляциологические исследования на куполе проведены также Б.И. Втюриным летом 1979/80 г. (Втюрин, 1980). Таяние снега и льда на куполе Беллинсгаузен исследовали китайские (в 1985–1992 гг.) (Jiahong et al., 1998) и немецкие (в 1997/98 и 1999/2000 г.) учёные (Braun, 2001). До настоящего времени из-за эпизодичности и кратковременности проведённых исследований общих закономерностей таяния снега и льда на куполе Беллинсгаузен установлено не было. Наши исследования на ку-

поле охватывают 11 летних сезонов: с 2007/08 по 2011/12 г. и с 2014/15 по 2019/20 г.; частично они были опубликованы (Мавлюдов, 2014, 2016). С ноября 2007 г. на ледниковом куполе Беллинсгаузен действует речная измерительная сеть из 29 реек, по которой проводились регулярные наблюдения. Сеть характеризует накопление и таяние снега и льда на всех склонах ледникового купола (см. рис. 1, c). Оказалось, что соотношение площадей в разных высотных зонах купола почти равномерно (рис. 2).

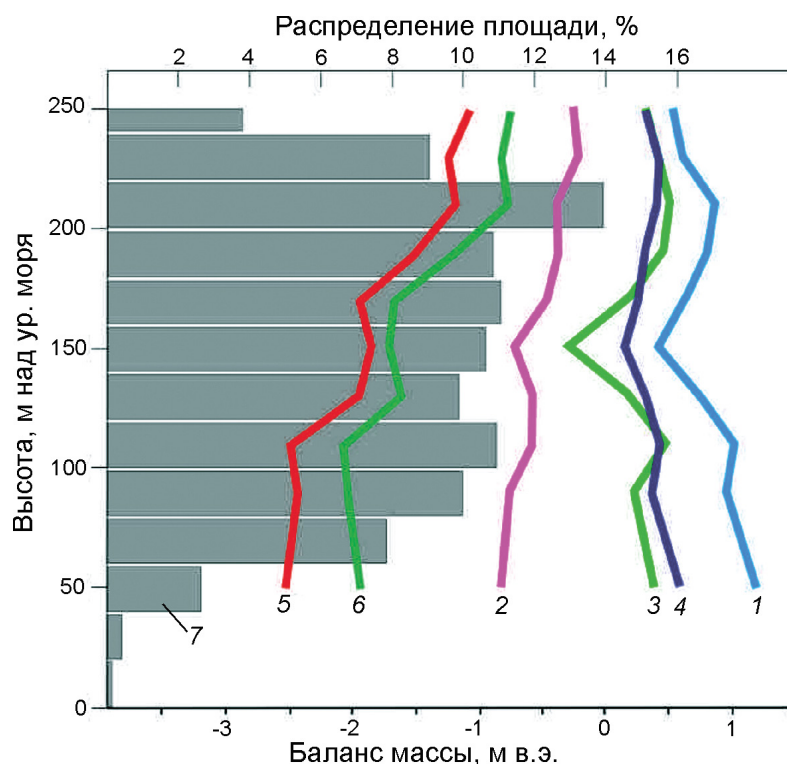


Рис. 2. Изменение баланса массы (м в.э.) на ледниковом куполе Беллинсгаузен с высотой, осреднение по 20-метровым высотным зонам.

1, 4 – зимний баланс массы; 2, 5 – летний баланс массы; 3, 6 – годовой баланс массы; 1–3 в 2009/10 г.; 4–6 в 2019/20 г.; 7 – распределение площадей по высотным зонам ледникового купола

Fig. 2. Changing of ice mass balance (m w.e.) with elevation on Bellingshausen Ice Dome, averaged on 20 m of elevation.

1, 4 – winter mass balance; 2, 5 – summer mass balance; 3, 6 – year mass balance; 1–3 in 2009/10; 4–6 in 2019/20; 7 – area distribution on Bellingshausen Ice Dome

Методика

Наблюдения за таянием снега и льда на куполе Беллинсгаузен проводили в летний период с 2007/08 по 2019/20 г., за исключением 2012/13 и 2013/14 гг. Данные о продолжительности периода абляции, времени наблюдений и сумме положительных температур на метеостанции Беллинсгаузен (16 м над ур. моря) приведены в табл. 1. Начало и конец сезона абляции определялись как дни, когда на метеостанции были отмечены первый и последний дни со среднесуточными положительными температурами воздуха. Были получены данные по таянию снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен за 11 полных сезонов абляции, а для сезонов 2012/13 и 2013/14 гг., когда наблюдения за таянием отсутствовали, была дана оценка летнего баланса массы по имеющимся данным за годы исследований (см. далее). Наши наблюдения показали, что продолжительность периода абляции на метеостанции Беллинсгаузен и на ледниковом куполе почти не различаются вне зависимости от высотного положения точек, что связано с обычным массивованным повышением температуры воздуха на несколько градусов в весеннее время и таким же резким понижением температуры в осеннее время.

Оценка таяния снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен проводилась по абляционным рейкам один раз в 1–2 недели в течение всего летнего сезона. Рейки, представляющие собой деревянные или бамбуковые жерди длиной от 2,3 до 3,5 м, устанавливались в лёд в скважинах глубиной 1 м на разных склонах ледникового купола. По мере вытаивания рейки перебуривались в ту же лунку. Высота рейки над поверхностью снега и льда измерялась рулеткой с точностью ± 1 см. Толщина снега у реек определялась с помощью металлического шупа. Для каждой абляционной рейки по результатам измерений подсчитывалось суммарное таяние снега, наложенного льда и ледникового льда в течение сезона абляции в водном эквиваленте (в.э.). Регулярные измерения плотности снега в течение летнего сезона проводили стандартным снегомером BC-43 в шурфах у реек R1, R4 (или R5), R8, R11 и EN (или FN) через 7–14 дней. Для измерения плотности наложенного льда использовали кольцевой бур для отбора керна и снегомер для его взвешивания. В настоящей работе наложенным льдом автор называет разновидность инфильтрационно-конгеляционного льда, который формируется в основном в начале периода абляции в основании снежной толщи на

Таблица 1. Продолжительность периода абляции, времени наблюдений и сумма средних суточных положительных температур воздуха на метеостанции Беллинсгаузен (16 м над ур. моря)*

Год	Начало сезона абляции	Конец сезона абляции	Начало наблюдений	Окончание наблюдений	N, дни	Число дней $T > 0$	$\Sigma T > 0$
2007/08	14.12.2007	07.04.2008	08.11.2007	09.03.2008	116	99	158,4
2008/09	18.11.2008	27.03.2009	03.11.2008	13.03.2009	130	125	217,1
2009/10	13.12.2009	15.04.2010	06.11.2009	14.04.2010	124	84	98,6
2010/11	01.11.2010	19.03.2011	05.11.2010	23.03.2011	139	111	176,6
2011/12	04.12.2011	27.03.2012	01.11.2011	14.04.2012	115	98	151,7
2012/13	26.12.2012	30.04.2013	—	—	126	95	93,2
2013/14	12.01.2014	11.03.2014			59	43	45,4
2014/15	05.12.2014	31.03.2015	25.11.2014	05.04.2015	117	86	108,9
2015/16	21.12.2015	31.03.2016	16.11.2015	03.05.2016	102	67	69,4
2016/17	21.11.2016	18.04.2017	22.11.2016	09.04.2017	149	120	202,5
2017/18	19.12.2017	21.04.2018	20.12.2017	21.04.2018	124	107	196,9
2018/19	29.11.2018	14.04.2019	29.11.2018	31.03.2019	137	92	96
2019/20	15.11.2019	18.04.2020	05.12.2019	18.04.2020	156	118	250,3
Среднее					121	96	143,5

*N — продолжительность сезона абляции; $\Sigma T > 0$ — сумма средних суточных положительных температур воздуха; число дней $T > 0$ — число дней с положительной температурой воздуха в течение сезона абляции; прочерк — отсутствие наблюдений.

поверхности ледникового льда при замерзании талых вод, просачивающихся сквозь снег, за счёт запаса холода внутри льда (Cogley et al., 2011).

Число реек в разных высотных зонах ледникового купола оказалось не пропорциональным площади этих зон. Так, зона от 200 м до вершины купола занимает около 25% всей площади купола, но на ней находится 12 реек, т.е. 40% всего их числа (29), а нижняя зона от 0 до 80 м, хоть и мала (около 12% всей площади), но реек там всего две (т.е. 6% всего числа реек). Поэтому расчёты средних снегозапасов и таяния, как средних значений измерений по рейкам, несколько завышают вклад верхней области ледника и занижают вклад его нижних частей. Однако в нижних частях купола снег сходит раньше, чем в верхних, и эти различия для снегозапасов частично необходимо компенсировать. Но в любом случае, поскольку наблюдения в разные годы вели по одной методике, они оказываются сравнимы и корректно показывают общую тенденцию изменений.

Результаты наблюдений

Изучение годового баланса массы на ледниковом куполе в период с 2007 по 2020 г. показало, что в течение этого периода на фоне общего отрицательного баланса массы только в 2009/10,

2012/13–2015/16 и 2018/19 гг. здесь был отмечен положительный баланс массы. Летний баланс массы на ледниковом куполе складывается из таяния и испарения. Испарение снега на куполе не изучено. Для острова Кинг-Джордж характерен морской климат с большим количеством жидких осадков, низкой облачностью (в среднем 22 дня в каждом месяце — облачные (Говоруха, Симонов, 1973)) и частыми туманами, поэтому на ледниковом куполе преобладает конденсация влаги, а испарение снега и льда в условиях небольших положительных температур воздуха и высокой влажности пренебрежимо мало и в первом приближении может не учитываться. Таким образом, основная составляющая ЛБМ на ледниковом куполе — таяние снега и льда, которое определяется главным образом воздействием солнечной радиации и температуры воздуха.

Рассмотрим особенности таяния снега и льда на куполе. Среднее (за годы наблюдений автора) максимальное и минимальное таяние снега и льда на куполе по всем рейкам на разных склонах и высотах различается более чем в 3 раза (от 42,3 до 148,5 см в.э.). На разных склонах купола по данным полевых наблюдений для профилей по рейкам строились высотные зависимости таяния (коэффициент вероятности 0,8–0,9). По полученным уравнениям регрессии рассчитывались вертикальные градиенты таяния (ВГТ) для каж-

Таблица 2. Летний баланс массы и вертикальные градиенты таяния снега и льда на куполе Беллинсгаузен

Сезоны абляции**	$\Sigma T > 0$	bs , см в.э.***	Таяние по рейкам, см в.э.		Вертикальный градиент таяния снега и льда с высотой, мм/м, по профилям на склонах					
			min	max	запад 1 (DN/88– IN/232)*	запад 2 (CN/110– 9N/250)*	юго-запад (R15/54– R8/219)*	юг (6N/91– 9N/250)*	восток (R13/84– R11/250)1	Среднее
2007/08	158,4	–74,8	47,9	137,8	—		5,3	—		5,3
2008/09	217,1	–130,8	58,8	234,4	11,2	9,7	10,7	11	6,2	9,8
2009/10	98,6	–47	13,8	85,7	1,8	1,8	2,7	3,7	3,9	2,8
2010/11	176,6	–101,2	30,3	90,3	1,5	2	2,4	2,7	3,3	2,4
2011/12	151,7	–109,8	57,9	201,6	3,9	4,6	8,6	8,2	4,8	6,0
2014/15	108,9	–44,8	27,2	96,4	3,9	2,1	4,7	5,2	4,3	4,0
2015/16	69,4	–47,8	19,5	80	2,1	2,2	3,9	3,8	3,4	3,1
2016/17	202,5	–89,1	39,0	148	3,9	2,8	2,3	3,9	4,9	3,6
2017/18	196,9	–108,7	52,0	183,2	4,7	4,2	7,9	7,6	3,7	5,6
2018/19	96	–55,5	27,2	95,6	3,1	2,9	4,4	2,7	3,4	3,3
2019/20	250,3	–183	91,8	280,9	7,7	9,7	9,5	11,3	5,7	8,8
Среднее	156,9	–90,2	42,3	148,5	4,4	4,2	5,7	6	4,4	4,9

*DN/88–IN/232 – нижняя и верхняя рейка профиля и их абсолютная высота (см. рис. 1, в); **для лета 2007/08 г. использованы только рейки R1–R11; ***измеренный летний баланс массы с учётом высотных зон; $\Sigma T > 0$ – сумма средних суточных положительных температур воздуха; курсивом выделены годы с положительным балансом массы; прочерк – отсутствие наблюдений.

дого склона (табл. 2). Поскольку склоны купола имеют примерно одинаковую протяжённость (около 1,5 км), полученные результаты вполне сравнимы. Для каждого летнего сезона по уравнению регрессии величины таяния от абсолютной высоты, полученному для реек со всех склонов ледникового купола, рассчитывался средний для купола ВГТ. Величина вертикального градиента таяния сильно меняется от года к году и по склонам купола. Максимальное таяние снега и льда на куполе отмечено летом 2008/09 и 2019/20 гг., когда максимальные значения ВГТ были установлены почти на всех склонах, кроме восточного. Это указывает на преобладающие ветры в эти сезоны абляции с запада и северо-запада.

В годы с отрицательным балансом массы на куполе отмечены максимальные вертикальные градиенты таяния (до 11,3 мм/м), а в годы с положительным балансом массы – минимальные (до 1,8 мм/м). На куполе в годы с положительным балансом массы (2009/10, 2014/15, 2015/16, 2018/19 гг.) минимальные ВГТ были на западных склонах, а в годы с отрицательным балансом массы – на южном и восточном склонах или только на восточном. При этом средние многолетние значения ВГТ почти на всех склонах очень близки (4,2–4,4 мм в.э. на 1 м) за исключе-

нием южного и юго-западного склонов, где ВГТ достигает 6 мм в.э. на 1 м, что, вероятно, связано с наименьшей инсоляцией по сравнению с другими склонами. Для получения общей картины таяния на ледниковом куполе Беллинсгаузен было рассмотрено по отдельности таяние снежного покрова, наложенного и ледникового льда.

Таяние снежного покрова. Снежный покров в зимнее время формируется на всей поверхности ледникового купола, но его толщина неравномерна. За счёт ветрового перераспределения количество снега увеличивается в привершинной и в нижней частях купола.

В среднем по рейкам для всего купола Беллинсгаузен таяние снега изменялось от 40,3 см в.э. (2009/10 г.) до 79,7 см в.э. (2010/11 г.) или в среднем за все 11 сезонов – 56,8 см в.э. (табл. 3). Близкие к средним значениям таяния отмечались в 2007/08 и 2008/09 гг. В 2009/10, 2012/13–2015/16, 2018/19 и 2019/20 гг. (в 2019/20 г. были небольшие снегозапасы) таяние снега было ниже среднего, а в 2010/11, 2016/17 и 2017/18 гг. превышало среднее значение. Рост плотности снега в начале процесса таяния был связан с фирнизацией и уплотнением снега, ростом ледяных линз и прослоев при реализации запасов холода, накопленного в течение зимнего периода, и суточ-

Таблица 3. Составляющие таяния (в среднем по всем рейкам) на куполе Беллинсгаузен

Сезоны абляции*	Таяние						
	снега		наложенно-го льда		ледниково-го льда		сумма, см в.э.
	см в.э.	%	см в.э.	%	см в.э.	%	
2007/08	56,8	77,2	8,8	12	8,0	10,8	73,6
2008/09	56,2	44,6	9,3	7,4	60,4	48	125,9
2009/10	40,3	94,6	0,7	1,6	1,6	3,8	42,6
2010/11	79,7	81,5	8,9	9,1	9,2	9,4	97,8
2011/12	69,3	65,0	14,4	13,5	22,9	21,5	106,6
2014/15	47,6	98,6	0,7	1,4	0	0	48,3
2015/16	43,7	96,3	1,7	3,7	0	0	45,4
2016/17	72,8	77,9	12,8	13,7	7,9	8,4	93,5
2017/18	64	56,8	16,2	14,4	32,4	28,8	112,6
2018/19	44,7	81	4,7	8,5	5,8	10,5	55,2
2019/20	50,1	28	31,4	18,2	93,0	53,8	174,5
Среднее	56,8	72,9	10	9,4	21,9	17,7	88,7

* Курсивом выделены годы с положительным балансом массы.

ных колебаний температуры. В дальнейшем плотность снега начинала уменьшаться, что связано с формированием слоя разуплотнения на первых 40–50 см снежной толщи в результате воздействия солнечной радиации. Плотность снега в верхнем слое (в среднем из 75 измерений) на 9%

(от 1,9 до 21,6%) меньше, чем средняя по толщине плотность снега. Если снег за лето полностью не тает, то он превращается в фирн, участки которого распространены в верхней части купола.

Средние по всем рейкам значения снегозапаса на куполе Беллинсгаузен в течение летних сезонов для всего периода наблюдений показаны на рис. 3. Несмотря на то, что тенденции изменения снегозапаса во времени на куполе Беллинсгаузен во все годы одинаковые, самые резкие его изменения в течение сезона абляции происходили в 2007/08 и 2010/11 гг., а во все остальные годы наблюдения таяние снега происходило медленнее, поэтому все кривые изменения снегозапаса во времени за эти годы почти параллельны. В 2007/08 и 2008/09 гг. весь снег, накопившийся на куполе за зиму, почти полностью таял, а в дальнейшем до 2016/17 г. количество снега на куполе начало возрастать и за сезон абляции таяло только около половины среднего снегозапаса накопившегося снега. С 2017/18 г. и по настоящее время общее количество снега и фирна на куполе начинает уменьшаться, но при этом ежегодно по-прежнему тает от половины имеющегося снега или даже более, как это было летом 2019/20 г. Если подобная тенденция уменьшения количества снега и

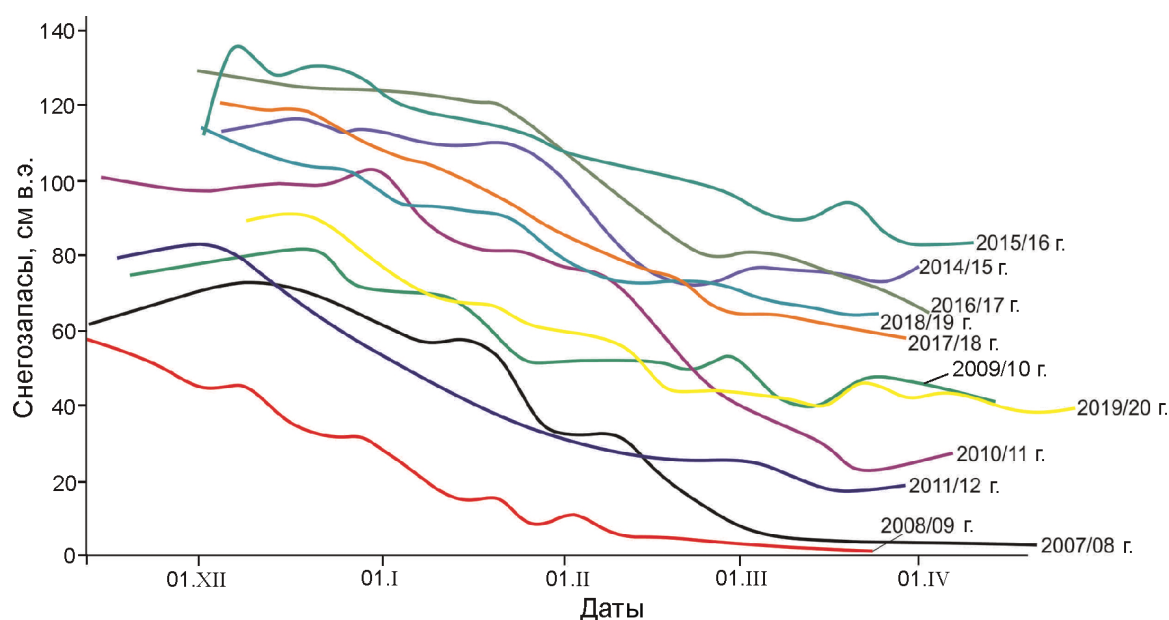


Рис. 3. Динамика снегозапасов (см в.э.), осреднённых по высотным зонам, на ледниковом куполе Беллинсгаузен за период наблюдений

Fig. 3. Dynamics of snow resources (cm w.e.) averaged on elevation zones on Bellingshausen Ice Dome for period of investigations

фирна на куполе будет продолжаться, то через несколько лет ситуация может вернуться к состоянию 2007/08 г., когда выпадающий за зиму снег таял на куполе полностью.

Естественное желание — сравнить результаты измерений снегозапаса на куполе с ходом осадков за холодный период на метеостанции Беллинсгаузен. Однако это сравнение не позволило выявить какую-либо зависимость, что, вероятно, связано с интенсивным ветровым перераспределением снега на ледниковом куполе. В северной и юго-восточной частях купола из-за неполного таяния снега в течение периода наблюдений происходило нарастание толщины фирна. В конце лета 2019 г. толщина фирна вместе с наложенным льдом в точке R7 достигала 7 м, а площадь его распространения составляла около 1,15 км².

Таяние наложенного льда. В отдельные годы средняя толщина наложенного льда составляла 14–16 см, что соответствовало его годовому приросту, а в другие годы превышала эту величину, так как он формировался за несколько лет. Значение плотности наложенного льда равно 0,82 г/см³ (среднее из 97 измерений в 2009 г.). Таяние наложенного льда начиналось после полного стаивания снега. На поверхности наложенного льда возникала кора таяния, напоминающая по виду фирнизированный снег. Кора таяния исчезала только после полного стаивания наложенного льда. Медленное таяние наложенного льда в течение периода абляции из-за высокого значения альбедо его коры таяния приводило к тому, что на склонах купола временами наблюдалась широкая полоса наложенного льда между ледниковым льдом и границей снега, которая могла достигать ширины 900 м. Связано это и с тем, что слой наложенного льда может быть многолетним и достигать значительной толщины. На внутренней границе зоны ледяного питания к лету 2019/20 г. уже накопилось 12 годовых слоёв наложенного льда. То, что полоса наложенного льда может иметь значительную ширину, обнаружили и другие исследователи, когда объясняли разницу в 50 м между абсолютной высотой наблюдаемой границы питания и фирновой линией, отслеженной по спутниковым данным (Braun, Rau, 2000). В конце сезона абляции 2019/20 г. в трещинах в области накопления снега была измерена толщина многолетнего наложенного льда около 3 м.

Таяние ледникового льда. Ледниковый лёд в каждой точке на куполе Беллинсгаузен начал таять после полного исчезновения снега и наложенного льда. Наложённый лёд отличается от ледникового мелкозернистой структурой и чистотой, в то время как на поверхности ледникового льда присутствуют хорошо видимые частички вулканического пепла. Когда слой наложенного льда утончается примерно до 4–5 см, солнечная радиация начинает проникать сквозь его толщу, прогревая подстилающий слой ледникового льда. Наибольшее прогревание получают частицы вулканического пепла, слои которого многочисленны в ледниковой толще. В результате в верхнем слое ледникового льда под наложенным льдом образуется кора таяния, которая оказывается пронизанной многочисленными вертикальными канальцами. После таяния наложенного льда такая кора таяния на льду быстро разрушается, что способствует выравниванию ледяной поверхности.

Если в 2007–2009 гг. ледниковый лёд таял практически на всей поверхности ледникового купола, то в последующем он таял главным образом по его периферии. В период с положительным балансом массы в 2012–2016 гг. ледниковый лёд практически не обнажался и не таял. Наибольшее таяние ледникового льда отмечалось в северо-западной части ледникового купола (на выровненном участке между рейками EN и FN) и в его юго-западной части (в районе рейки R4). В среднем по рейкам на куполе Беллинсгаузен растаяло ледникового льда (в в.э.) от 0 (2012/13–2015/16 гг.) до 93 см (2019/20 г.) или в среднем за 13 сезонов абляции — 18,4 см. Чтобы более полно охарактеризовать общие особенности таяния снега, фирна и льда на ледниковом куполе, были рассмотрены два года с разным знаком баланса массы. Для года с положительным балансом массы взят летний сезон 2009/10 г., а для года с отрицательным балансом массы — летний сезон 2019/20 г.

Летний сезон 2009/10 г. Этот сезон оказался довольно холодным — со средней летней температурой 0,2 °С (при средних многолетних значениях около 0,94 °С), что было вызвано многочисленными вторжениями холодного воздуха в течение лета со стороны антарктического материка, во время которых отмечались восточные и юго-восточные ветры, отрицательные темпе-

Таблица 4. Климатические и гляциологические параметры для ледникового купола Беллинсгаузен в 2009/10 и 2019/2020 гг.*

Параметры	2009/10 г.	2019/20 г.
Средняя температура в XII/I/II/III месяцах, °C	0,1/0,5/0,2/0,0	0,5/2,7/2,5/0,8
Средняя летняя температура за декабрь–март, °C	0,2	1,6
Продолжительность периода абляции (на уровне метеостанции/на вершине купола), дни	124/122	156/156
Сумма среднесуточных $T > 0$, °C	98,6	250,3
Число дней с $T > 0/T < 0$	84/40	118/38
Доля дней с $T < 0$ в течение сезона абляции, %	32	24
Число дней с $T > 0/T < 0$ в течение декабря–марта	71/50	96/25
Количество атмосферных осадков за декабрь–март, мм	258,9	240
Число дней с дождём/с дождём и снегом/со снегом в декабре–марте	20/3/36	38/9/12
Площадь области аккумуляции, км ²	8,07	0
Площадь области абляции, км ²	0,42	8,49
AAR	0,95	0
Средняя высота снеговой (фирновой) линии, м над ур. моря	71	218
Средняя высота границы питания, м над ур. моря	55	>250
Максимальный/минимальный снегозапас в начале сезона (с учётом площади высотных зон), см в.э.	88,6/38,3	75,7/33,1
Летний баланс массы (с учётом площади высотных зон), см в.э.	–47	–183
Зимний баланс массы (с учётом площади высотных зон), см в.э.	76,3	36,2
Годовой баланс массы (с учётом площади высотных зон), см в.э.	29,3	–146,8

*AAR – отношение области аккумуляции к общей площади купола; высотное распределение баланса массы за два года, см. рис. 2; T – температура воздуха, °C.

ратуры воздуха и летние снегопады. Несмотря на то, что период абляции продолжался на ледниковом куполе четыре месяца, из-за холодного лета в среднем растаяло количество снега и льда, эквивалентное 49,0 см в.э. (см. табл. 2), а область аккумуляции составила 95% площади ледникового купола. Снеговая линия на склонах разной экспозиции находилась на разной высоте. Снег полностью растаял только в основаниях восточной и юго-восточной частей ледникового купола, а также пятнами в юго-западной и северо-западной частях купола (см. рис. 1, в). Поскольку наложенный лёд относится к области аккумуляции, высота границы питания на восточном и юго-восточном склонах купола находилась ниже снеговой линии. Снегозапас на ледниковом куполе, рассчитанный в среднем по рейкам, в начале сезона абляции составил 88,6 см в.э., а в его конце сократился до 38,3 см в.э. При этом толщина снега в конце сезона абляции распределялась по территории ледникового купола почти равномерно. Климатические параметры и гляциологические характеристики этого сезона приведены в табл. 4.

Летний сезон 2019/20 г. Этот сезон оказался самым тёплым за период наблюдений, что было вызвано преобладанием западных и северо-западных ветров, приносящих тепло со стороны Тихого океана. Период абляции продолжался на ледниковом куполе пять месяцев, и из-за тёплого лета на куполе в среднем растаяло количество снега и льда, эквивалентное 190,6 см в.э. (см. табл. 2). Интенсивное таяние снега и льда привело к тому, что область абляции охватила 100% площади ледникового купола. Даже на участке аккумуляции последних лет (в районе рек R6–R9, N8 и N9) растаял весь снег, накопившийся за предыдущую зиму, и начал таять подстилающий его фирн. Несмотря на повсеместное интенсивное таяние, в верхней части ледникового купола сохранилась значительная по площади территория, покрытая фирном (см. рис. 1, г). Это связано с накоплением в предыдущие годы существенной толщи фирна в привершинной части ледникового купола. При этом высота фирновой линии распределялась по склонам купола очень неравномерно: выше поля фирна мог располагаться участок обнажившегося леднико-

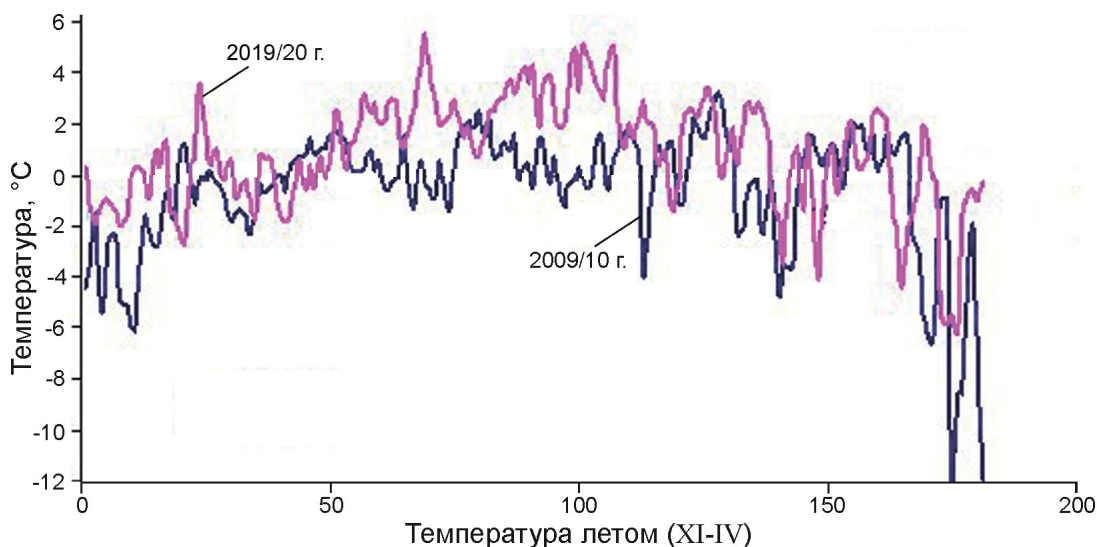


Рис. 4. Температура воздуха на метеостанции Беллинсгаузен летом 2009/10 и 2019/20 гг. с 1 ноября по 30 апреля. Данные из (Электронный ресурс)

Fig. 4. Air temperature on Bellingshausen weather station in summer 2009/10 and 2019/20 from 1st November to 30th April. Data from (Electronic resource)

вого льда, как это происходило на северо-западном склоне купола.

Сравнение таяния снежного покрова и льда в 2009/10 и 2019/20 гг. Летний сезон 2009/10 г. был существенно холоднее, чем летний сезон 2019/20 г., как по средним месячным значениям и средней летней температуре, так и по сумме положительных температур (см. табл. 4). Несмотря на то, что количество выпавших за летний сезон осадков было близким, летом 2009/10 г. преобладали дни со снегопадами, а летом 2019/20 г. — дни с дождями и моросью. Сравнение снегозапасов в начале летнего сезона показало в 2009/10 г. большее значение, чем в 2019/20 г. Осенью снегозапасы в обоих случаях оказались близкими. Если снег в конце летнего сезона 2009/10 г. покрывал почти всю территорию ледникового купола, то в конце лета 2019/20 г. фирн сохранился только в верхней части ледникового купола. Результатом такого различия в температуре и осадках в оба сезона стала разница в гляциологических показателях, рассчитанных по результатам наблюдений: площади областей аккумуляции и абляции; высоты границы питания; зимнего, летнего и годового баланса массы (см. табл. 4).

Связь таяния снега и льда с температурой воздуха. В летний сезон 2019/20 г. температура воздуха почти на протяжении всего периода была выше, чем в летний сезон 2009/10 г. (рис. 4). Раз-

ница температур между грунтом вне ледника и льдом (средний температурный скачок) для ледникового купола по результатам измерений была принята равной 0,2 °C. В зависимости от направления ветра средний вертикальный температурный градиент (ВТГ) колебался в очень широких пределах: при еженедельных измерениях от 0,2 до -1,5 °C на 100 м высоты и при средних за сезон — около -0,8 °C на 100 м высоты. При смене направления ветров с юго-восточного на западный румб ВТГ ослабевает. Однако сравнение таяния, рассчитанного по температурному скачку и ВТГ, с реальным таянием по рейкам показало, что наиболее корректно отражающим особенности таяния снега и льда на склонах ледникового купола оказался средний ВТГ, равный -0,25 °C на 100 м высоты. К аналогичным значениям ВТГ для расчётов таяния на ледниковом куполе пришли также немецкие учёные, проводившие исследования в конце XX в. (Braun, Hock, 2003).

По сумме суточных положительных температур ($\Sigma T > 0$), измеренных на метеостанции, температурному скачку и ВТГ можно рассчитать сумму положительных температур для каждой абляционной рейки. Зная количество растаявшего снега и льда по рейкам в течение сезона абляции, можно вычислить локальный температурный коэффициент таяния (ТКТ). При расчёте ТКТ для летних сезонов 2009/10 и 2019/20 гг. оказалось, что

он сильно меняется от рейки к рейке, а также во времени. Например, у рейки R1 для недельных интервалов наблюдений в летний сезон 2019/20 г. ТКТ льда менялся (здесь и далее в мм в.э.) от 6,5 до 24,8 мм/(°C сут.), среднее 15,5 мм/(°C сут.) в в.э. (12 измерений). Для той же рейки в летний сезон 2009/10 г. ТКТ снега колебался от 3,8 до 25,4 мм/(°C сут.), среднее 12,4 мм/(°C сут.) (11 измерений). Зависимости ТКТ от $\Sigma T > 0$ обнаружить не удалось. Средний ТКТ снега в 2009/10 г. для всех реек был равен 14,8 мм/(°C сут.); среднее из 31 измерения с колебаниями от 7,6 до 24,6 мм/(°C сут.). Повышенное значение ТКТ может быть связано с высокой влажностью воздуха и большим влиянием конденсации на таяние снега. Для 2019/20 г. был рассчитан отдельно ТКТ: а) для снега — 11,4 мм/(°C сут.), среднее из 27 значений; колебания от 6,4 до 18,7 мм/(°C сут.); б) для наложенного льда — 8,5 мм/(°C сут.), среднее из 11 значений, колебания от 6,3 до 12,8 мм/(°C сут.); в) для ледникового льда — 13,2 мм/(°C сут.), среднее из 17 значений, колебания от 7,8 до 15,9 мм/(°C сут.). Среднее значение ТКТ совместно для наложенного и ледникового льда равно 11,4 мм/(°C сут.), т.е. одинаковое со снегом. Большая величина ТКТ для снега в более холодный сезон 2009/10 г. по сравнению с более тёплым сезоном 2019/20 г. была связана как с малыми снегозапасами в 2019/20 г., так и с тем, что период

таяния снега в этот сезон пришёлся на самый холодный период — декабрь. Средний температурный коэффициент таяния для снега, полученный в 2009/10 и 2019/20 гг., составлял 13,1 мм/(°C сут.).

Сравним среднее таяние снега и льда, осреднённое по площади купола, со средним значением $\Sigma T > 0$ для средней высоты ледникового купола, рассчитанным с учётом высотных зон и равным 154 м над ур. моря. Для расчётов применялся вертикальный температурный градиент, равный $-0,25$ °C на 100 м высоты, так как при использовании больших градиентов для некоторых летних сезонов для периода наблюдений в верхней части купола были получены отрицательные значения таяния, чего в действительности не происходило. Для 2009/10 г. ТКТ был равен 9,5 мм/(°C сут.), ТКТ общего таяния снега, наложенного и ледникового льда в 2019/20 г. — 10,3 мм/(°C сут.). Близость полученных значений свидетельствует о малой разнице температурного коэффициента таяния для снега и льда на ледниковом куполе. Это может быть связано как с заплывённостью снега, так и с продолжительными периодами облачной и туманной погоды.

По значениям $\Sigma T > 0$ на метеостанции, приведённой к средней высоте ледникового купола, был рассчитан летний баланс массы на куполе на весь период полевых наблюдений при разных ТКТ (рис. 5). Для построения графика

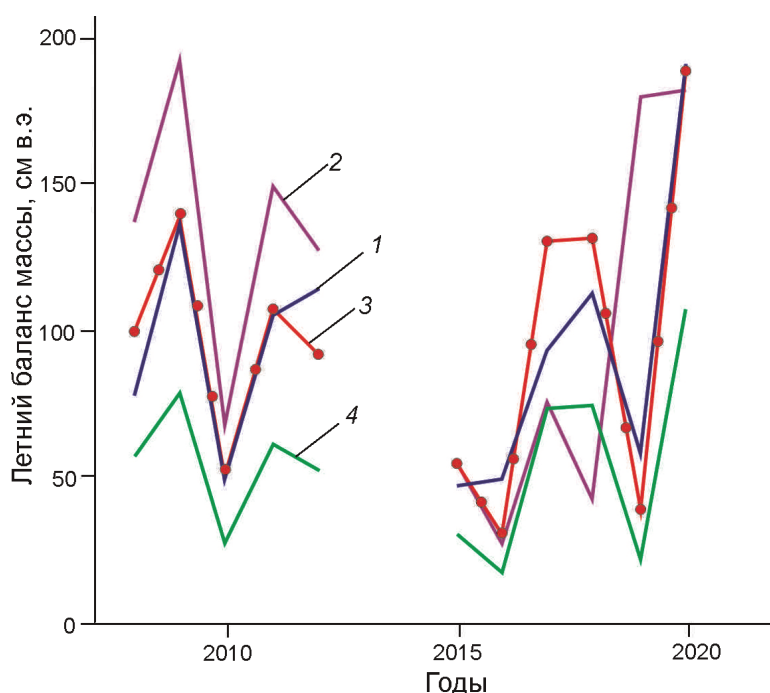


Рис. 5. Измеренные и расчётные значения летнего баланса массы при разных величинах температурного коэффициента таяния. 1 — измеренный летний баланс массы; летний баланс массы при температурном коэффициенте таяния, мм/(°C сут.): 2 — 13,1; 3 — 9,5; 4 — 5,4

Fig. 5. Measured and calculated summer mass balances at different degree day factor. 1 — measured summer mass balances; summer mass balances at degree day factor equal, mm/(°C day): 2 — 13,1; 3 — 9,5; 4 — 5,4

ков использованы значения ТКТ от 13,1 до 5,4 мм/(°С сут.). Степень отличия рассчитанных значений ЛБМ от натурных наблюдений при ТКТ, равном 9,5 мм/(°С сут.), оказалась наименьшей — среднее отклонение по всем годам наблюдений составило 1,6%, в то время как для ТКТ 13,1 мм/(°С сут.) среднее отклонение составило 50%, а для ТКТ 5,4 мм/(°С сут.) — 42,4%. Вероятно, величина 9,5 мм/(°С сут.) — наиболее близка к среднему значению ТКТ для периода наблюдений на ледниковом куполе. Попытка использовать ТКТ, равный 5,4 мм/(°С сут.), вычисленный для этого региона ранее (Costi et al., 2018), не увенчалась успехом, поскольку при применении этого коэффициента происходит серьезное занижение летнего баланса массы во все годы наблюдений (см. рис. 5).

Наблюдается хорошая связь суммы средних суточных положительных температур на метеостанции Беллинсгаузен и ЛБМ ледникового купола ($R^2 = 0,82$). Для этой связи были рассчитаны значения ЛБМ для всего периода наблюдений. Для расчётов ЛБМ использованы $\Sigma T > 0$, полученные по сумме срочных наблюдений (четыре раза в сутки), а также средних суточных температур или средних месячных температур, поскольку корреляция между этими суммами очень хорошая ($R^2 = 0,97 \div 0,98$).

Летний баланс массы на период наблюдений рассчитан по ТКТ, сумме суточных положительных температур воздуха на метеостанции Беллинсгаузен, средней летней температуре воздуха за декабрь—март, сумме средних месячных положительных температур воздуха на метеостанции Беллинсгаузен. Расчётные данные для отдельных лет иногда хорошо совпадают с измеренными значениями, вне зависимости от способа расчёта, как произошло для летнего сезона 2008/09 г. Однако в большинстве случаев полного совпадения нет. Наибольшее согласие измеренных и расчётных данных приходится на первый период наблюдений (2007—2012 гг.), когда температуры воздуха, видимо, играли наибольшую роль в ЛБМ. Во втором периоде наблюдений (2014—2020 гг.) отмечается более существенная рассогласованность расчётных и измеренных данных вне зависимости от способа расчёта, что, возможно, связано с увеличившейся долей влияния других факторов на ЛБМ, которые могут быть связаны с изменением погодных условий.

Поскольку все использованные методы расчёта могут как завышать значения летнего баланса массы, так и занижать его, нет полной уверенности в том, что произойдёт при восстановлении отсутствующих данных в 2012/13 и 2013/14 гг. При этом коэффициент достоверности расчётных значений ЛБМ распределяется таким образом: для ТКТ — 0,86; для $\Sigma T > 0$ — 0,82; для средней летней температуры — 0,74. Рассчитанные значения ЛБМ по всем методам для 2012/13 г. достаточно близки, а для 2013/14 г. относительно близкие значения получены по $\Sigma T > 0$ и ТКТ. Используя осреднённые данные по $\Sigma T > 0$ и ТКТ, получаем осреднённые величины ЛБМ, равные для 2012/13 г. — 43 см в.э., а для 2013/14 г. — 17,5 см в.э.

Несмотря на то, что используемые методы расчёта ЛБМ по средней летней температуре и ТКТ в целом неплохо совпадают с осреднёнными по территории купола натурными измерениями, при использовании для расчёта ЛБМ по отдельным рейкам они оказались непригодными, поскольку либо занижали величину таяния в нижней части купола и завышали в его верхней части, либо занижали или завышали таяние на всех рейках. Суточные данные по температуре воздуха доступны с 2002 г., поэтому за последние 18 лет есть возможность рассчитать динамику изменения ЛБМ по сумме суточных положительных температур и по ТКТ. Для восстановления ЛБМ на ледниковом куполе для более длительного периода можно использовать средние летние температуры воздуха или суммы средних месячных положительных температур, которые доступны с начала наблюдений (с 1968 г.).

Для построения кривой изменения ЛБМ с 1969 по 2020 г. (рис. 6) используем зависимость ЛБМ на куполе Беллинсгаузен от средней летней температуры воздуха, полученную для периода наблюдений с добавлением расчётных значений для 2012/13 и 2013/14 гг.: $A = -34,955e^{0,8893T}$, см в.э. ($R^2 = 0,9$), где A — летний баланс массы на куполе; T — средняя летняя температура воздуха на метеостанции Беллинсгаузен за декабрь—март, °С. Правомочность этого определяется тем, что среднее отклонение аппроксимированных и расчётных значений летнего баланса массы по имеющемуся ряду наблюдений составляет — 1,1 см в.э., среднее квадратическое отклонение оказалось равным

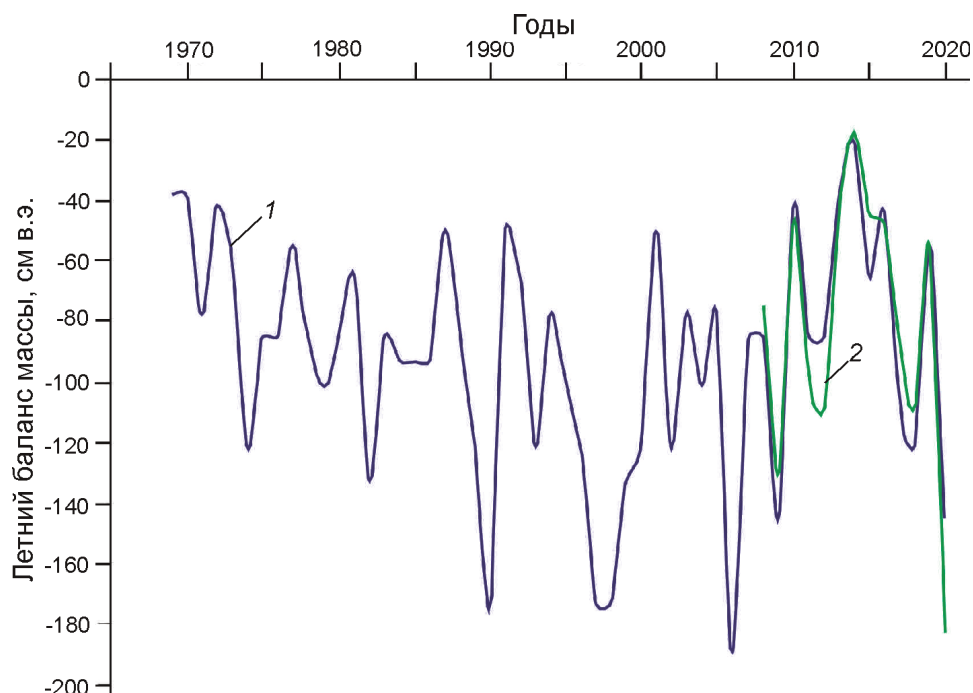


Рис. 6. Восстановленные значения летнего баланса массы на куполе Беллинсгаузен в 1969–2020 гг., см в.э.
1 – расчётный летний баланс массы; 2 – измеренный летний баланс массы

Fig. 6. The restored values of summer mass balance on Bellingshausen Ice Dome in 1969–2020, cm w.e.
1 – calculated summer mass balance; 2 – measured summer mass balance

17,7 см в.э.. Вычисление средней относительной ошибки аппроксимации дало значение около 17%, что можно считать вполне удовлетворительным для такого короткого ряда наблюдений.

На рис. 6 можно видеть, что, несмотря на существенные по амплитуде ежегодные колебания величины ЛБМ, в пределах всей кривой условно можно выделить несколько довольно устойчивых периодов. Первый период – с 1969 по 1985 г., когда ЛБМ изменялся от –40 см в.э. в год в 1969 г. до примерно –90 см в.э. в год в 1985 г.; второй период – с 1986 по 2009 г., когда ЛБМ находился на квазистационарном уровне – около –90 см в.э. в год с колебаниями от –50 до –150 см в.э. в год; третий период – начиная с 2009 г., когда ЛБМ вновь начал уменьшаться. Это показывает некоторое понижение летних температур в регионе, что наиболее чётко видно в период с 2009 по 2014 г. С 2015 до 2020 г. устанавливается тренд на увеличение абсолютной величины ЛБМ. Считая зимний баланс массы постоянным (Электронный ресурс), мы можем полагать, что изменения ЛБМ соответствуют тенденциям общих изменений годового баланса массы на ледниковом куполе.

Обсуждение

Сравним наши данные с результатами, полученными другими исследователями на разных ледниках о. Кинг-Джордж. Исследование на леднике Барановского, расположенном примерно в 40 км к востоку от купола Беллинсгаузен, показало, что в период понижения температур в летние месяцы 2012–2015 гг. наблюдается замедление темпов отступления края ледника и изменения высоты поверхности льда на леднике (Szilo, Bialik, 2018). Замедление темпов таяния в области абляции в период с 2001 по 2012 г. с $-1,5 \pm 0,5$ м/год до $-0,5 \pm 0,6$ м/год в 2012–2016 гг. было отмечено и на леднике Экологическом, расположенном в 40 км к востоку от ледникового купола Беллинсгаузен, что связывается с уменьшением летних температур в этом регионе Антарктического полуострова (Petlicki et al., 2017). Всё это полностью соответствует наблюдениям автора статьи. Наши исследования и исследования других авторов (Pudełko et al., 2018; Braun, 2001) показывают наибольшую зависимость абляции на острове от температуры воздуха.

В работе (Perondi, 2018) анализируются изменения ледников на восточной стороне ледяного поля Варшава: Экологического, Сфинкс, Барановского, Тауэр и Уинди с 1956 по 2017 г. Показано, что все ледники в течение этого периода отступают, но для периода 2000–2017 гг. на ледниках Сфинкс и Тауэр отмечено некоторое замедление скорости сокращения их размеров. Те же ледники изучали другие исследователи (Pudełko et al., 2018), и они пришли к аналогичным выводам по отступанию ледников, но отмечали, что в 2011–2018 гг. скорость отступления замедлилась — авторы связывают подобное с уменьшением в этот период годовой суммы положительных суточных температур (данные с метеостанций Беллинсгаузен, Карлини и Ферраз). Об уменьшении размеров этих ледников с 1956 по 2015 г. есть данные и в работе (Pasik et al., 2021), где отмечено понижение температур в 2012–2016 гг., что, в частности, отразилось не только в стабилизации поверхности ледников, но и в наступании языка Экологического ледника между 2013 и 2014 г. Анализ изменения баланса массы и высоты границы питания на леднике Фуркад на южном склоне ледникового поля Варшава, близ аргентинской станции Карлини с 2011 по 2015 г. (Falk et al., 2018), показал, что с 2012 по 2015 г. на леднике на фоне негативного баланса массы произошла его стабилизация на высотах до 250 м над ур. моря, — баланс ледника стал положительным на больших высотах.

Приведённые данные в той или иной степени подтверждают наши полевые наблюдения. Что касается восстановленных данных, то их верификация более трудна, так как в большинстве публикаций этого периода конкретные данные по ежегодным значениям летнего баланса массы отсутствуют. В работе (Jiahong et al., 1998) приводятся данные по годовому балансу массы ледникового купола в 1990/91 г., который был равен 16,3 см в.э. По нашим данным (см. рис. 6) в 1990/91 г. летний баланс был минимальным, что соответствует положительному годовому балансу массы. Форма кривой изменения годового баланса массы за 1971–1992 гг., приведённая в работе (Jiahong et al., 1998), в целом соответствует форме кривой на рис. 6 за тот же период, что может служить подтверждением корректности наших построений.

Сравнение данных по кумулятивному таянию снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен

в 1998–2009 гг. (Rückamp et al., 2011) и на протяжении периода наших наблюдений с 2007 по 2020 г. показывает, что на высоте около 70 м над ур. моря на куполе в первый период растаяло около 14 м в.э. снега и льда, а во второй — около 9,8 м в.э. снега и льда. Средняя скорость таяния снега и льда в первый период составила 127 см в.э. в год, а во второй — 75 см в.э. в год, т.е. уменьшилась в 1,7 раза. Основываясь на своих данных, авторы (Rückamp et al., 2011) рассчитали, что, если скорость таяния не изменится, ледниковый купол Беллинсгаузен полностью исчезнет через 285 лет. Как видно, за последний период скорости таяния существенно уменьшились даже несмотря на то, что в летний сезон 2019/20 г. таяние на этой высоте составило около 250 см в.э. Это означает, что вряд ли стоит строить прогнозы на изменение ледников на столь продолжительные периоды, поскольку изменения на ледниках могут произойти как в ту, так и в другую сторону очень быстро, что невозможно предсказать. В настоящее время можно утверждать, что ледниковый купол Беллинсгаузен находится в квазистабильном состоянии, несмотря на отдельные годы прироста и потери массы. Фактически это означает, что период стабильности с 1971 по 1992 г. (Jiahong et al., 1998) в дальнейшем сменился периодом активного таяния, завершившимся в 2008 г., за которым последовал новый период стабилизации. При этом за весь период наблюдений границы ледникового купола почти не претерпели изменения, несмотря на понижение его поверхности, особенно интенсивной на краях купола. Это связано с тем, что краевая морена с ледяным ядром, которая представляет собой часть ледникового купола и расположена по его периферии, перекрыта слоем моренного материала толщиной от 0,1 до 1 м, который существенно замедляет таяние льда в ядре морены. Толщина льда на краю купола у контакта с мореной ещё велика, поэтому понижение поверхности льда пока не сказывается на изменении площади ледникового купола. При этом в восточной части купола, где нет морены, отмечается отступление края льда со скоростью до 2 м/год.

Изучению современного и прошлого состояния ледникового купола Беллинсгаузен (старое название Коллинз) посвящено несколько современных работ (Simoes et al., 2015, Petsch et al., 2020). В работе (Simoes et al., 2015) по аэрофото-

и космическим снимкам исследуется в основном изменчивость ледникового купола Беллинсгаузен с 1983 по 2006 г. В работе (Simoes et al., 2015) показано, что площадь купола постоянно сокращается. К сожалению, пользоваться этими данными невозможно, поскольку проведенные границы изменения края ледникового купола недостоверны. Некорректно показано положение снеговой линии для 2006 г. Авторы ошибочно считают краевую морену ледникового купола конечной мореной. В работе (Petsch et al., 2020) рассмотрено возможное поэтапное изменение размеров западной части ледникового купола от современного состояния до 2030, 2050 и 2070 гг. с использованием сценария, предложенного в работе (Rückamp et al., 2011). Как отмечалось ранее, использование данного сценария может быть не вполне корректно, так как летний баланс массы сильно меняется во времени. Авторы ошибочно считают краевую морену ледникового купола конечной и по её внутренней границе проводят положение края ледника во время малого ледникового периода, хотя эта морена с ледяным ядром является составной частью ледникового купола. Кроме того, в западной части ледникового купола граница малого ледникового периода проведена произвольно (уходит далеко на запад от границы морены) как в северной, так и в южной частях, где граница пересекает морену. Некорректно проведены и границы купола в 1989 и 2018 гг.

На основании полученной связи ЛБМ и средней летней температуры за декабрь–март можно видеть, что происходит с ЛБМ на ледниковом куполе при повышении и понижении средней летней температуры воздуха. Так, при средней летней температуре около 1°C её повышение на $0,5^{\circ}\text{C}$ приводит к росту абсолютной величины ЛБМ на куполе на 56% среднего значения, а при похолодании на $0,5^{\circ}\text{C}$ ЛБМ понижается на 36%. Это — результат наших наблюдений, поскольку он охватывал разные сезоны абляции со средней летней температурой от $-0,6$ до $1,6^{\circ}\text{C}$. Если полученная связь корректна и при более высоких температурах воздуха, то при потеплении на 1°C ЛБМ ледникового купола изменится на 143,5%. При этом уже при средней летней температуре более $1,6^{\circ}\text{C}$ ледниковый купол полностью потеряет область аккумуляции, как это наблюдалось в 2019/20 г. Поэтому

повышение средней летней температуры на $0,6–0,7^{\circ}\text{C}$ в течение продолжительного периода приведёт к необратимым последствиям на всей территории ледникового купола.

Отметим, что наши оценки изменения ЛБМ отличаются от оценок других авторов. Например, для ледника Экологического на основе наблюдений в 1991/92 г. подсчитано, что повышение температуры на 1°C приведёт к увеличению абляции на 15% (Bintanja, 1995). Повышение температуры воздуха на 1 и 2°C должно увеличить осреднённую абляцию на о. Кинг–Джордж за шестинедельный период на 27 и 62% соответственно (Braun, 2001; Braun, Hock, 2004), что, согласно представлениям авторов, свидетельствует о высокой чувствительности к потенциальному будущему потеплению климата в этом районе. Большая разница с нашими данными, вероятно, связана как с более продолжительным периодом наших наблюдений, охватывающим весь сезон абляции в течение ряда лет, так и с высоким положением высоты границы питания в период с 2017 по 2020 г., когда она находилась вблизи или выше вершины ледникового купола, а также с тем, что высота ледникового купола Беллинсгаузен (около 250 м над ур. моря) составляет только около трети высоты ледникового купола Арктовский (около 700 м над ур. моря), на северо-западном склоне которого проводили наблюдения (Braun, 2001; Braun, Hock, 2004). Согласно нашим данным, ледниковый купол Беллинсгаузен не только стал более чувствительным к изменению климата, чем ледник Экологический, расположенный в центральной части острова, но и, вероятно, более чувствительным к изменению климата в настоящее время по сравнению с 1998–1999 гг.

Заключение

На основе обобщения данных многолетнего ряда наблюдений за таянием снега и льда на ледниковом куполе Беллинсгаузен (остров Кинг–Джордж (Ватерлоо), Южные Шетландские острова, Антарктика) дана оценка вклада в летнюю абляцию на куполе таяния снега, наложенного и ледникового льда. В тёплые сезоны доля таяния снега уменьшается, но возрастает доля таяния льда, в холодные сезоны таяние в основ-

ном ограничивается снегом. Анализ показал, что с 2009 по 2016 г. запасы снега на куполе увеличивались, а после 2016 г. начали уменьшаться, что связано не только с усилением таяния снега и льда, но и с уменьшением зимнего снегонакопления. Наименьшие высотные градиенты таяния ($-1,5 \div -2,0$ мм в.э. на 1 м) отмечались на западном склоне при положительном балансе массы льда на куполе, а наибольшие градиенты таяния (до -11 мм в.э. на 1 м) зафиксированы на южном склоне при отрицательном балансе массы льда на куполе.

Сравнение данных по таянию снега и льда на куполе и сумм положительных средних суточных температур воздуха на метеостанции Беллинсгаузен в более холодный (2009/10 г.) и более тёплый (20019/20 г.) годы позволило рассчитать средний температурный коэффициент таяния снега и льда, равный $9,5$ мм/(°C сут.), который был проверен и по другим годам. Это дало возможность оценить средний летний баланс массы на куполе на годы отсутствия наблюдений. Использование средней летней температуры воздуха позволило восстановить ряд летнего баланса массы на куполе с 1969 по 2020 г., что показало его динамику во времени. Поскольку летний баланс массы играет решающую роль в годовом балансе массы, полученная кривая в целом отражает ход годового баланса массы на куполе. При хорошей связи летнего баланса массы на куполе со средней летней температурой воздуха можно количественно оценить изменение летнего баланса массы при изменении средней летней температуры. Согласно нашим наблюдениям, по-

вышение средней летней температуры на $0,5$ °C по отношению к средней температуре за период наблюдений (около 1 °C) приводит к повышению летнего баланса массы на 56% , в то время как понижение средней летней температуры на $0,5$ °C ведёт к понижению летнего баланса массы на 36% . Согласно расчётам, повышение средней летней температуры на 1 °C может изменить летний баланс массы на ледниковом куполе примерно на $143,5\%$. Это показывает очень высокую чувствительность ледникового купола Беллинсгаузен к изменению климата.

Благодарности. Автор приносит благодарность Институту географии РАН за предоставленную возможность работы в Антарктике на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо), которая была обеспечена Российской Антарктической экспедицией. Работа выполнена в рамках госзадания № 0148–2019–0004 (AAAA–A19–119022190172–5) «Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата» и при частичной поддержке межрегионального проекта МАГАТЭ INT5153.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to Institute of geography of the Russian Academy of Sciences for the given possibility of work in Antarctic on King George (Waterloo) Island which has been provided by the Russian Antarctic Expedition. Work is executed within the limits of the state task № 0148–2019–0004 (AAAA–A19–119022190172–5) «Glaciation and accompanying natural processes at climate changes» and at partial support of inter-regional project INT5153 of IAEA.

Литература

- Втюрин Б.И. Полевые гляциологические и геокриологические исследования на острове Кинг-Джордж в 25 Советской Антарктической экспедиции // МГИ. 1980. Вып. 39. С. 30.
- Говоруха Л.С., Симонов И.М. Географические исследования на острове Кинг-Джордж // Информ. бюлл. САЭ. 1973. № 85. С. 8–15.
- Заморуев В.В. Результаты гляциологических наблюдений на станции Беллинсгаузен в 1968 г. // Тр. САЭ. 1972. Т. 55. С. 135–144.
- 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 (125). С. 27–34.

References

- Vtyurin B.I. Field glaciological and geocryological investigations on King George Island in 25 Soviet Antarctic expedition. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1980, 39: 30. [In Russian].
- Govorukha L.S., Simonov I.M. Geographical investigations on King George Island. *Informatsionnyj bulletin' Sovetskoy Antarkticheskoy Expeditsii*. Inform. Bulletin of the Soviet Antarctic Expedition. 1973, 85: 8–15. [In Russian].
- Zamoriev V.V. Results of glaciological observations on Bellingshausen station. *Trudy Sovetskoy Antarkticheskoy Expeditsii*. Transactions of the Soviet Antarctic Expedition. 1972, 55: 135–144. [In Russian].
- Mavlyudov B.R. Ice mass balance on Bellingshausen Ice Dome in 2007–2012 (King George Island, South

- Мавлюдов Б.Р. Купол Беллинсгаузен // Вопросы географии. Сб. 142. География полярных регионов. М.: Изд. дом. «Кодекс». 2016. С. 629–648.
- Орлов А.И. Географические исследования на полуострове Файлдс // Тр. САЭ. 1973. Т. 58. С. 184–207. Электронный ресурс: www.aari.aq (дата обращения: 25.02.2022).
- Bintanja R. The local surface energy-balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modelling // Antarctic Science. 1995. V. 7 № 3. P. 315–325. doi: 10.1017/S0954102095000435.
- 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.
- Braun M., Rau F. Using a multi-year data archive of ERS SAR imagery for the monitoring of firn line positions and ablation patterns on the King George Island ice cap (Antarctica) // Proc. of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, June 16–17, 2000. № 1. P. 281–291.
- Braun M.H., Hock R. Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica) // Global and Planetary Change. 2004. V. 42. № 1. P. 45–58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2003.11.010.
- Cogley J.G., Hock R., Rasmussen L.A., Arendt A.A., Bauder A., Braithwaite R.J., Jansson P., Kaser G., Möller M., Nicholson L., Zemp M. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP–VII Technical Documents in Hydrology, No. 86; IACS Contribution No. 2. UNESCO Working Series SC-2011/WS/4. Paris: UNESCO-IHP. 2011. 115 p.
- Costi J., Arigony-Neto J., Braun M., Mavlyudov B., Barrand N.E., Da Silva A.B., Marques W.C., Simoes J.C. Estimating surface melt and runoff on the Antarctic Peninsula using ERA–Interim reanalysis data // Antarctic Science. 2018. V. 30. № 6. P. 379–393. doi: 10.1017/S0954102018000391.
- Falk U., López D.A., Silva–Busso A. Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modelling and equilibrium line altitude on King George Island, Antarctic Peninsula // The Cryosphere. 2018. V. 12. № 4. P. 1211–1232. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1211-2018>.
- Jiahong W., Jiancheng K., Jiankang H., Zichu X., Leibao L., Dali W. Glaciological studies on the King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica // Annals of Glaciology. 1998. V. 27. P. 105–109. doi: 10.3189/1998AoG27-1-105-109
- Oliva M., Navarro F., Hrbáček F., Hernández A., Nývlt D., Pereira P., Ruiz-Fernández J. & Trigo R. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere // Science of the Total Environment. 2017. V. 580. P. 210–223.
- Shetland Islands, Antarctic). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 27–34. [In Russian].
- Mavlyudov B.R. Bellingshausen Ice Dome. *Voprosy geographii*. 142. *Geografiya Polyarnykh regionov*. Problems of Geography. 142. Geography of Polar regions. Moscow: Publ. House «Koдекс», 2016: 629–648. [In Russian].
- 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].
- Electronic resource: www.aari.aq (last access: 25 February 2022). [In Russian].
- Bintanja R. The local surface energy-balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modeling. *Antarct. Sci.* 1995, 7 (3): 315–325. doi:10.1017/S0954102095000435.
- 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.
- Braun M., Rau F. Using a multi-year data archive of ERS SAR imagery for the monitoring of firn line positions and ablation patterns on the King George Island ice cap (Antarctica). *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, June 16–17. 2000*, 1: 281–291.
- Braun M.H., Hock R. Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica). *Global and Planetary Change*. 2004, 42 (1): 45–58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2003.11.010.
- Cogley J.G., Hock R., Rasmussen L.A., Arendt A.A., Bauder A., Braithwaite R.J., Jansson P., Kaser G., Möller M., Nicholson L., Zemp M. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP–VII Technical Documents in Hydrology, No. 86; IACS Contribution No. 2. UNESCO Working Series SC-2011/WS/4. Paris: UNESCO-IHP, 2011: 115 p.
- Costi J., Arigony-Neto J., Braun M., Mavlyudov B., Barrand N.E., Da Silva A.B., Marques W.C., Simoes J.C. Estimating surface melt and runoff on the Antarctic Peninsula using ERA–Interim reanalysis data. *Antarctic Science*. 2018, 30 (6): 379–393. doi: 10.1017/S0954102018000391.
- Falk U., López D. A., Silva–Busso A. Multi-year analysis of distributed glacier mass balance modelling and equilibrium line altitude on King George Island, Antarctic Peninsula. *The Cryosphere*. 2018, 12 (4): 1211–1232. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1211-2018>.
- Jiahong W., Jiancheng K., Jiankang H., Zichu X., Leibao L., Dali W. Glaciological studies on the King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1998, 27: 105–109. doi:10.3189/1998AoG27-1-105-109.

- Orheim O., Govorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands // *Annals of Glaciology*. 1982. V. 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. № 4. P. 1532. <https://doi.org/10.3390/s21041532>.
- Perondi C. Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, ilha Rei George. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, 2018. 123 p. <http://hdl.handle.net/10183/180993>.
- Petlicki M., Szilo J., MacDonell S., Vivero S., Bialik R.J. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica) // *Remote Sens.* 2017. V. 9. № 6. P. 520. <https://doi.org/10.3390/rs9060520>.
- Petsch C., Rosa K.K.d., Vieira R., Braun M.H., Costa R.M., Simões J.C. The effects of climatic change on glacial, proglacial and paraglacial systems at Collins Glacier, King George Island, Antarctica, from the end of the Little Ice Age to the 21st century // *Investigaciones geográficas* 2020. № 103. elocation e60153. <https://doi.org/10.14350/rig.60153>.
- Pudełko R., Angiel P.J., Potocki M., Jędrejek A., Kozak M. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018 // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. № 6. P. 892. <https://doi.org/10.3390/rs10060892>.
- Rückamp M., Blindow N. King George Island ice cap geometry updated with airborne GPR measurements // *Earth System Science Data*. 2012. V. 4. № 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.5194/essd-4-23-2012>.
- Rückamp M., Braun M., Suckro S., Blindow N. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade // *Global and Planetary Change*. 2011. V. 79. № 1–2. P. 99–109.
- Simoes C.L., Rosa K.K.d., Czapela F.F., Vieira R., Simoes J.C. Collins Glacier Retreat Process and Regional Climatic Variations, King George Island, Antarctica // *Geogr. Review*. 2015. V. 105. № 4. P. 462–471. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2015.12091.x>.
- Szilo J., Bialik R.J. Recession and ice surface elevation changes of Baranowski Glacier and its impact on proglacial relief (King George Island, West Antarctica) // *Geosciences*. 2018. V. 8. № 10. P. 355. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100355>.
- Oliva M., Navarro F., Hrbáček F., Hernández A., Nývt D., Pereira P., Ruiz-Fernández J., Trigod R. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Science of the Total Environment*. 2017, 580: 210–223.
- Orheim O., Govorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands. *Annals of Glaciology*. 1982, 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 (4): 1532. <https://doi.org/10.3390/s21041532>.
- Perondi C. Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, ilha Rei George. Dissertação (Mestrado) UFRGS, Porto Alegre, 2018: 123 p. <http://hdl.handle.net/10183/180993>.
- Petlicki M., Szilo J., MacDonell S., Vivero S., Bialik R.J. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sens.* 2017, 9 (6): 520. <https://doi.org/10.3390/rs9060520>.
- Petsch C., Rosa K.K.d., Vieira R., Braun M.H., Costa R.M., Simões J.C. The effects of climatic change on glacial, proglacial and paraglacial systems at Collins Glacier, King George Island, Antarctica, from the end of the Little Ice Age to the 21st century. *Investigaciones geográficas*. 2020, 103: elocation e60153. <https://doi.org/10.14350/rig.60153>.
- Pudełko R., Angiel P.J., Potocki M., Jędrejek A., Kozak M. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018. *Remote Sens.* 2018, 10 (6): 892. <https://doi.org/10.3390/rs10060892>.
- Rückamp M., Blindow N. King George Island ice cap geometry updated with airborne GPR measurements. *Earth Syst. Sci. Data*. 2012, 4 (1): 23–30. <https://doi.org/10.5194/essd-4-23-2012>.
- Rückamp M., Braun M., Suckro S., Blindow N. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change*. 2011, 79 (1–2): 99–109.
- Simoes C.L., Rosa K.K.d., Czapela F.F., Vieira R., Simoes J.C. Collins Glacier Retreat Process and Regional Climatic Variations, King George Island, Antarctica. *Geogr Rev.* 2015, 105 (4): 462–471. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2015.12091.x>.
- Szilo J., Bialik R.J. Recession and ice surface elevation changes of Baranowski Glacier and its impact on proglacial relief (King George Island, West Antarctica). *Geosciences*. 2018, 8 (10): 355. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100355>.