

УДК 551.89; 551.32

ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЛЕДНИКОВОГО КУПОЛА БЕЛЛИНСТАУЗЕНА (ОСТРОВ КИНГ-ДЖОРДЖ, АНТАРКТИКА) В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

© 2024 г. Б. Р. Мавлюдов

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: bulatrm@bk.ru*

Поступила 08.07.2024 г.

После доработки 26.08.2024 г.

Принята к печати 07.10.2024 г.

Рассмотрено изменение ледникового купола Беллинсгаузен на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) в позднем голоцене по имеющимся геоморфологическим и биологическим признакам, а также по данным радиоуглеродного датирования органических остатков, обнаруженных в моренах с ледяным ядром или вне них (мертвые мхи, ракушки и кости кита). Выделено два этапа активизации ледникового купола Беллинсгаузена – 600–800 и 300 лет назад.

Ключевые слова: ледниковый купол, динамика оледенения, границы льда, радиоуглеродное датирование

DOI: 10.31857/S2076673424040136, **EDN:** HSRDIP

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возросло понимание того, что ледниковые щиты и ледники Антарктиды были подвержены достаточно большим изменениям в позднем голоцене (Simms et al., 2021). Косвенные данные предполагают наличие неогляциального роста размеров ледников, но к настоящему времени датировано еще недостаточное количество морен или связанных с ледниками отложений этого времени по сравнению с ледниковыми ландшафтами Северного полушария. Поэтому среди ученых продолжаются споры о том, происходил или нет в некоторых частях Антарктиды рост ледников в малый ледниковый период (далее – МЛП), который хорошо задокументирован в Северном полушарии. Рассмотрим эти вопросы на примере о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), расположенного в архипелаге Южных Шетландских островов вблизи Антарктического полуострова.

Оледенение острова Кинг-Джордж занимает около 92% его территории, что примерно равно 1044 км² (Simões et al., 2004). Оледенение острова представляет собой систему взаимосвязанных ледниковых куполов высотой до 750 м над ур. моря. Ледниковые купола частично разгружаются в море через выводные ледники, такие как Ланге, Ушер, Коллинз и др. (Braun et al., 2001). Остальные участки куполов малоподвижны. Нижние части ледниковых куполов и выводных ледников в настоящее

время находятся в основном в стадии деградации, хотя в верхней части ледяных полей происходит интенсивное накопление массы снега (Rückamp et al., 2011). В некоторых случаях ледники при отступании оставляют после себя моренные гряды (Birkenmajer, 1979), а иногда после деградации никаких или почти никаких следов не бывает. Это может быть связано как с неподвижностью краев ледниковых шапок, так и с отсутствием обломочного материала во льду, а может объясняться и интенсивным морозным выветриванием и солифлюкционными процессами в перигляциальной зоне, быстро уничтожающими моренный рельеф.

Ледниковый купол Беллинсгаузен – самый западный купол острова Кинг-Джордж (Ватерлоо). Он расположен в северо-восточной части полуострова Файлдс, самой большой территории острова, свободной ото льда. Ледниковый купол почти повсеместно заканчивается на суше на высотах от 1 до 40 м над ур. моря, за исключением его северной части, где он примыкает к другим ледниковым куполам острова на высоте около 215–230 м над ур. моря. Размеры купола 3–3.5 км, площадь незаморенной части купола около 9 км², общая площадь купола около 10 км², наибольшая высота около 250 м над ур. моря. В северо-западной, западной, юго-западной, южной и юго-западной частях ледниковый купол примыкает к краевой морене с ледяным ядром, сформированной надвигами. И только в восточной части купола со стороны

залива Коллинз была обнаружена напорная морена, средняя часть которой разрушена морем.

Ледниковый купол Беллинсгаузен получил свое название, утвержденное впоследствии Научным комитетом по изучению Антарктики (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR), в 1984 г. по предложению польских исследователей (Composite...). До этого с 1968 г. его называли Малым куполом или куполом «А» (а большой купол, ныне купол Арктовского, куполом «Б») (Заморуев, 1972). На немецком фотоплане полуострова Файлдс 1988 г. купол почему-то был назван куполом Коллинз по имени примыкающей морской бухты и имени выводного ледника, спускающегося в бухту с севера. Такое же название купола было приведено и на первой топографической карте полуострова Файлдс, выполненной чилийскими геодезистами в 1996 г. Многие исследователи до 2001 г. и позже использовали аналогичное название купола (например, Hall, 2007; Simões et al., 2015; Petsch et al., 2020). Однако это, во-первых, нарушает правила наименования объектов, принятые SCAR, а во-вторых, приводит к путанице, так как некоторые исследователи называют ледником Коллинз весь ледяной покров о. Кинг-Джордж (например, Jiankang et al., 1999; Seong et al., 2008). В соответствии с перечнем географических названий SCAR для Антарктики мы будем использовать название «купол Беллинсгаузен».

К настоящему времени ледниковый купол Беллинсгаузен изучен неплохо. На нем в 1968–1970 гг. масс балансовые наблюдения проводили сначала советские учёные (Заморуев, 1972; Говоруха, Симонов, 1973; Orkheim, Govogukha, 1982), затем в 1991–1995 гг. китайские исследователи (Wen et al., 1998, Jiankang et al., 1999), далее в 1999–2008 гг. немецкие ученые (Braun, 2001, Rückamp et al., 2011). С 2007 по настоящее время на ледниковом куполе Беллинсгаузен масс балансовые исследования проводят российские исследователи (Мавлюдов, 2022, 2023).

Вопросами динамики оледенения на полуострове Файлдс в прошлом занимались разные исследователи (Watcham et al., 2011, Веркулич и др., 2012; Heredia Varión et al., 2022), но большинство из них интересовались общей голоценовой историей оледенения полуострова. И только в работе (Hall, 2007) впервые был частично поднят вопрос о состоянии ледникового купола во время позднего голоцена. По ее данным после ~650 лет назад (~1300 г.), одновременно с МЛП в Европе ледниковый покров расширился не менее чем на 400–500 м по отношению к современной границе. Автор показал, что распространение льда во время МЛП было наибольшим за последние 3500 лет. При этом отложения МЛП были найдены только на одном участке морены ледникового купола. Граница максимального распространения льда в

течение МЛП была проведена в работах (Simões et al., 2015, Petsch et al., 2020), основанных на единичных полевых исследованиях и анализе космических снимков. Однако во всех этих работах граница распространения льда во время МЛП проведена довольно условно. В настоящей работе на основании новых датировок, результатах полевых исследований и опубликованных данных мы попытались установить динамику КБ в позднем голоцене и местоположение его границы во время МЛП.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КУПОЛА БЕЛЛИНСГАУЗЕН

Купол Беллинсгаузена представляет собой ледниковую шапку с очень пологими склонами, уклон которых на многих участках купола не превышает 10° , и плоскую вершину. И только в восточной части основание купола имеет уклон около 20° и на отдельных участках ледяной обрыв высотой в несколько метров. По всему периметру кроме самой северной и восточной частей купол Беллинсгаузен оконтуривается мореной с ледяным ядром. В северной части лед просто налегает на крупный скальный выступ, который некогда был нунатаком. В восточной части купола видна напорная конечная морена, которая спускалась в море, где она и была в средней части разрушена морскими водами (рис. 1).

Морена с ледяным ядром сформирована серией крупных субпараллельных надвигов (на северо-западе купола их насчитывается более 20), по плоскостям которых из-под ледника были вынесены на поверхность примороженные к нижней части льда донные отложения. Эти отложения были представлены донной мореной, морскими и наземными отложениями, которые сформировались задолго до МЛП, а некоторые и задолго до максимума оледенения. В частности, в западной части купола у края льда были найдены морские раковины возрастом около 45 тысяч лет и более (Hall, 2007; Веркулич и др., 2012). Присутствие надвигов в моренах впервые было отмечено в работе (Hall, 2007). Наше обследование всех морен с ледяным ядром на куполе Беллинсгаузена показало, что участие надвигов в их формировании происходило повсеместно, кроме восточной части купола. Вынесенный по плоскостям надвигов из-под ледника материал (в виде слоев толщиной до 1 м и более) бронирует все поверхности с внутренней стороны каждой из гряд морены с ледяным ядром с уклоном около 40° . Толстый слой морены на внутреннем крае моренной гряды во многих случаях очень сильно замедляет или даже полностью предотвращает таяние льда под ней. Однако с внешней стороны моренного комплекса толщина слоя обрушивающегося с гребня морены материала уменьшается до 0.05–0.3 м, что приводит к таянию подстилающего

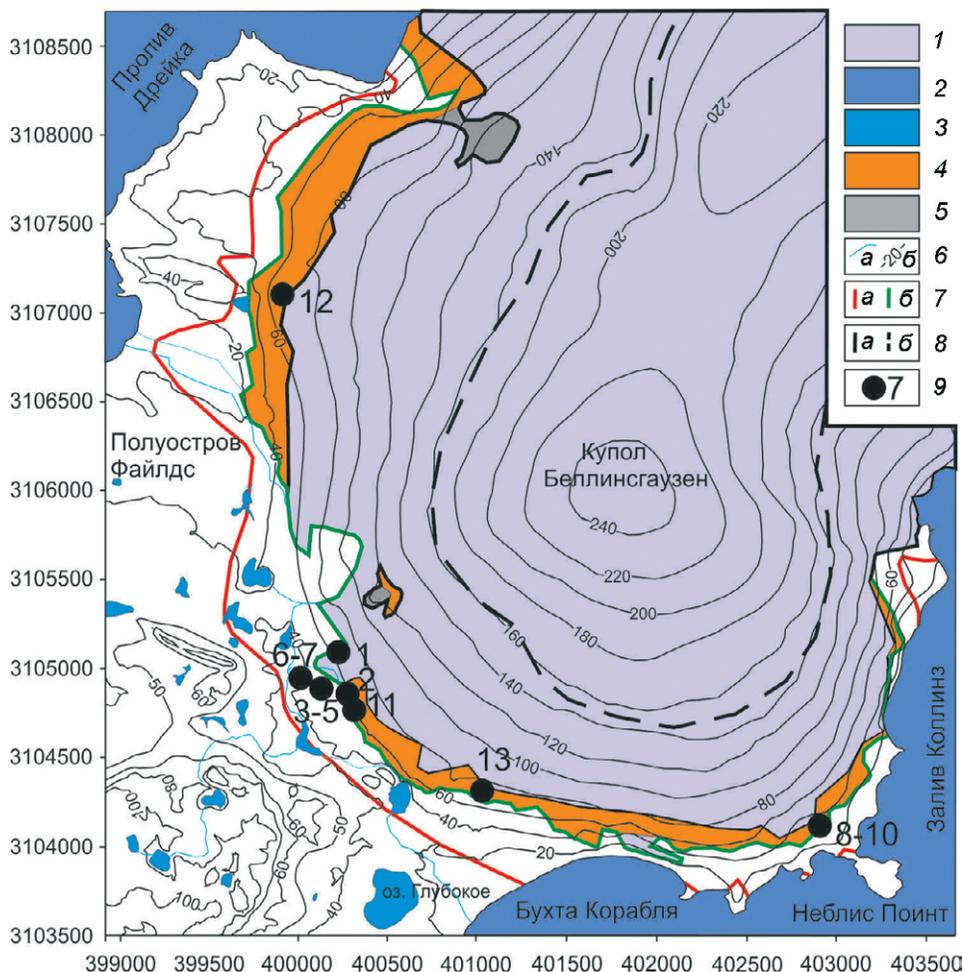


Рис. 1. Ледниковый купол Беллинсгаузен. 1 – ледник; 2 – море; 3 – озера; 4 – морена с ледяным ядром; 5 – нуна-таки; 6 – территория, свободная от льда: а – основные водные потоки, б – горизонтали и их высоты); 7 – границы купола: а – в 1956 г., б – в 2019 г.; 8 – границы: а – чистого льда, б – предполагаемая граница купола после потепления 1400–800 лет назад; 9 – места отбора проб на радиоуглеродное датирование (см. табл. 1)

Fig. 1. Bellingshausen Ice Dome. 1 – glacier 2 – sea; 3 – lakes; 4 – ice core moraine; 5 – nunataks; 6 – ice-free area: а – main water flows, б – horizontal lines and their heights); 7 – boundaries of the dome: а – in 1956, б – in 2019; 8 – ice dome boundaries: а – pure ice, б – estimated boundary of the dome after warming 1400–800 years ago; 9 – sampling sites for radiocarbon dating (see Table 1)

льда и сползанию моренного материала вниз по склону. Таким образом, морена с ледяным ядром представляет собой грядку с внутренним более стабильным склоном (или склонами) и внешним нестабильным склоном, по которому постоянно вниз по склону перемещается моренный материал. Несмотря на кажущееся обилие сползающего материала водные потоки, текущие у края льда, выносят мелкозем и мелкие обломки так, что при отступании края льда на склоне не формируются гряды моренных отложений. Выглядит это так, как будто край льда всегда имел современное положение, и водный поток у его края течет в постоянном месте. Особенно хорошо это заметно на склонах рельефа, падающих под край льда. Границу края льда купола Беллинсгаузена следует проводить по внешнему

краю морены с ледяным ядром, так как чистый и покрытый моренным чехлом лед представляет собой единое целое. При этом движение льда отсутствует или почти отсутствует как в пределах морены с ледяным ядром, так и в краевой части купола. На первый взгляд возникает ощущение, что размеры купола остаются стабильными во времени, практически не смещаясь с 2006 г. Однако это не совсем так, и край льда под моренным чехлом постепенно смещается, уменьшая размеры ледникового купола. По нашим измерениям в последние годы скорость отступания края льда на внешней стороне морены с ледяным ядром в среднем не превышает 1–2 м в год. На участках, где лед лежит за пределами морены с ледяным ядром или перекрывает ее, там отступление края льда происходит

интенсивнее и может достигать 2.5 м/год и более (Evgrafova et al., 2024).

Период похолодания климата в 2009–2016 гг. показал, что в условиях холодного лета высота границы питания опускается до уровня моря и накопленный за зиму снег сохраняется не только на поверхности чистого льда внутри полукольца моренной гряды, но и с ее внешней стороны. Поскольку в течение всего периода сохранения снега в его основании за лето ежегодно накапливался слой наложенного льда в среднем толщиной около 15 см, через несколько лет из-за сохранения слоя снега с внешней стороны морены под ним возникала толща льда, которая была распространена в пространстве за внешним краем морены. Фактически, это был неподвижный лед, прислоненный к морене с ледяным ядром с внешней стороны. За счет прироста такого льда площадь купола в период похолодания увеличивалась. По-видимому, такая же ситуация могла возникнуть и во время МЛП, когда значительная ледяная толща сформировалась за пределами морены с ледяным ядром. Наличие активной части купола Беллинсгаузена в виде моренной гряды, сформированной надвигами, и пассивной его части, расположенной с внешней стороны морены, говорит о значительных по продолжительности периодах активизации и стабилизации в истории купола. При накоплении льда с внешней стороны морены толщина льда внутри полукольца моренной гряды также вырастала. На аэрофотоснимках 1956 г. хорошо видно, что лед распространен далеко за краем морены с ледяным ядром (см. рис. 1), а сама морена только чуть-чуть выступает из-под льда, а местами (на западе купола), морена оказалась полностью перекрыта льдом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы положены исследования автором ледникового купола Беллинсгаузен в течение 2007–2012 и 2014–2024 гг. В это время исследования проводились как на ледниковом льду, так и в пределах моренного комплекса и приледниковой территории. В качестве границы купола Беллинсгаузена в разные периоды времени принималось положение края льда за пределами, по границе морены с ледяным ядром или внутри современного полукольца моренной гряды. При сокращении размеров купола у его края могли накапливаться как наземная органика (мхи), так и при более высоком уровне моря морские отложения (кости кита и ракушки). Для оценки возможности проведения границы купола во время МЛП мы использовали следующие полевые данные: границу распространения лишайников вокруг ледникового купола, границу распространения ступеней, образованных водными потоками, текущими вдоль смещающегося края льда, границы положения морены

с ледяным ядром, а также аэрофотоснимки 1956, 1983–1984 гг. и космические снимки разных лет. С целью анализа характера изменения размеров ледникового купола в прошлом мы можем ориентироваться только на оценки ситуации с распространением остатков растительности на территориях, ранее покрытых льдом, и найденных в отложениях, выдвинутых надвигами из-под льда в пределах морен с ледяным ядром, и сохранившейся на поверхности нунатаков. Мы можем базироваться на предположении, что при освобождении ото льда поверхность отложений начинает колонизироваться растительностью в течение 1–3 лет (Miller et al., 2023), в нашем случае – мхами и лишайниками. Значит, наличие мхов определенного возраста говорит об отсутствии льда на этой территории в момент его роста (Hall, 2007; Pendleton et al., 2019). На многих участках у западных границ купола после отступления края льда на поверхности грунта был обнаружен мертвый мох. Это свидетельствовало о присутствии участков мохового покрова на территориях вне современного положения морены с ледяным ядром до того, как его накрыло льдом. Значит, возраст этого мха показывает время увеличения размеров купола. Внутри территории, окруженной мореной, о присутствии мха и других органических остатков можно было судить по их находкам, выдвинутым по надвигам на гребни морены с ледяным ядром. Таким образом, для анализа изменения границы купола во времени были использованы данные радиоуглеродного датирования органических остатков (мхи, водоросли, ракушки и костные остатки) из моренных отложений, полученных разными исследователями (Hall, 2007; Веркулич и др., 2012; Heredia Varion et al., 2022), а также автором, и карта подледного рельефа на территорию ледникового купола, полученная при помощи геофизических методов (Sobiech, 2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение размеров купола Беллинсгаузен. Известно, что купол Беллинсгаузена приобрел близкие к современным размеры еще около 5000 лет назад, что подтверждается данными, полученными при анализе озерных кернов (Веркулич и др., 2012). Видимо, размеры купола мало менялись в течение следующих 1000 лет при относительно стабильном прохладном климате.

4000–2000 лет назад. Для этого периода было характерно потепление климата, что вызвало сокращение размеров ледникового купола (Веркулич и др., 2012). Авторами высказывались даже предположения, что в это время купол Беллинсгаузена мог исчезнуть полностью. Это предположение было основано на том, что купол может исчезнуть довольно быстро, как, например, согласно расчетам, при сохранении современных климатических условий

(до похолодания 2009–2016 гг.) купол может полностью исчезнуть в ближайшие 285 лет (Rückamp et al., 2011). Однако никаких доказательств полного исчезновения купола в этот период найдено не было. Относительно небольшая толщина льда в краевых частях купола Беллинсгаузена, которая составляет первые десятки метров (Sobiech, 2015), делают предположение о существенном сокращении размеров купола в период длительного потепления климата вполне достоверным. Но сказать однозначно, исчезал в это время ледниковый купол полностью или нет, не представляется возможным. Отложения этого периода возрастом от 2000 до 3500 лет назад были обнаружены в моренах на юго-западе и юго-востоке (Неблис Поинт) купола (Hall, 2007; Веркулич и др., 2012).

2000–1400 лет назад. В тот период на полуострове Файлдс было зафиксировано относительное похолодание климата (Веркулич и др., 2012). Однако не были найдены отложения, которые начали бы накапливаться в это время. Косвенным подтверждением возможности этого похолодания и возможного распространения льда до современного положения на куполе Беллинсгаузена может быть только отсутствие дат мхов на моренах, относящихся к этому периоду времени (Hall, 2007; Веркулич и др., 2012). В этот период купол мог либо начать расти от своего сокращенного реликтового состояния, либо от вновь возрожденного.

Анализ данных, полученных при изучении кер-на скважины во льду, пробуренной китайскими учеными на вершине ледникового купола в 1991–1993 гг. до глубины 80.2 м при толщине льда 120–130 м, и модельным расчетам, показал, что возраст льда в основании ледяной толщи может достигать примерно 2000 лет (Jiankang et al., 1999). Данные бурения на куполе Беллинсгаузен также свидетельствуют о том, что, по крайней мере, начиная с 2000 лет назад, купол Беллинсгаузен сохранялся, правда, изменяя свои размеры.

Косвенным доказательством того, что капол Беллинсгаузена в это время разрастался и на некоторых участках мог достигать примерно современных размеров, можно судить по датам моренных отложений возрастом примерно 2000–1600 лет назад в районе мыса Неблис-Поинт на юго-востоке купола (Веркулич и др., 2012). О том же говорит и находка мхов возрастом около 2000 лет назад на западе купола (Hall, 2007).

1400–600 (800) лет назад. В этот период отмечено потепление климата (Веркулич и др., 2012). О теплом климате и отступании края льда можно судить по многочисленным датированным остаткам мха этого возраста, найденным на гребнях морен с ледяным ядром (табл. 1). Все это говорит о том, что на протяжении довольно значительного времени (по крайней мере, с 1300 до 800 лет назад) мхи

росли внутри контура морены с ледяным ядром, что также свидетельствует о значительном сокращении площади купола Беллинсгаузена. Однако точных размеров купола в это время установить не удается.

Остатки мха в отложениях, выдвинутых из-под льда надвигами, в западной части купола мы не обнаружили выше 130 м над ур. моря, что может быть косвенным свидетельством того, что выше мог располагаться лед. При этом на нунатаке на том же склоне, на высоте около 200 м над ур. моря, который вскрылся из-под льда в 2018 г., никаких следов растительности обнаружено не было. Значит, граница льда в период последнего сокращения площади ледникового купола в его западной части могла располагаться между 130 и 200 м над ур. моря. Отсутствие следов растительности на нунатаке на абсолютной высоте около 200 м может говорить и о том, что лед здесь мог сохраняться и в период предыдущего потепления, произошедшего между 4000 и 2000 лет назад.

Но в южной части купола остатки растительности отсутствуют на выступах ложа уже на высоте 80–83 м над ур. моря. Вероятно, на южном склоне купола лед до начала МЛП опускался до этих высот. Однако возможно, что мох на этих выступах просто не сохранился из-за движения льда. В целом вся морена с ледяным ядром в южной части купола содержит гораздо меньше растительных остатков, чем в западной части купола, что, возможно, говорит о том, что лед до начала МЛП здесь распространялся ниже, чем на западном склоне. На юго-востоке ледникового купола мох рос внутри контура морены, что хорошо видно по остаткам мха в надвигах в пределах морены вблизи полуострова Неблис Поинт. Однако до каких высот мог располагаться мох в этой части купола – неизвестно. Остатки мха были найдены и в морене с ледяным ядром на северо-западе купола, что также свидетельствует о присутствии мхов внутри контура морены с ледяным ядром.

Используя полученные данные и основываясь на карте подледного рельефа (Sobiech, 2015), мы приблизительно провели границу купола Беллинсгаузен в период сокращения масштабов оледенения после потепления 1400–800 лет назад (рис. 2).

600 (800) – 300 лет назад. В течение последних 600 лет на полуострове имело место, как минимум, одно похолодание, которое вызвало увеличение заснеженности территории и небольшое продвижение границ ледникового купола. Свидетельством этому служат включенные в моренные отложения на краю и вблизи края ледника мхи возрастом примерно до 600 лет назад (Hall, 2007; Веркулич и др., 2012). Однако даты этого времени отражают положение границы льда около 600 лет назад, когда

Таблица 1. Радиоуглеродное датирование образцов возрастом перед и во время малого ледникового периода из морен купола Беллинсгаузен

№*	Образец	№	Место	Положение	Возраст, лет BP	Автор
1	мох	АА-43568	морена	на западе купола	1200±81	Hall, 2007
2	мох	АА-43565	морена	на западе купола	824±92	Hall, 2007
3	мох	АА-46798	морена	на западе купола	745±55	Hall, 2007
4	мох	АА-46809	морена	на западе купола	683±42(86%) 577±13(14%)	Hall, 2007
5	мох	АА-46802	морена	на западе купола	654±34 (57%) 583±30 (43%)	Hall, 2007
6	мох	АА-44276	поверхность вне морены	на западе купола	304±31 (45%) 403±55 (42%) 162±12 (11%)	Hall, 2007
7	мох	АА-44276, повтор	поверхность вне морены	на западе купола	104±47 (44%) 225±53 (40%) 27±21 (16%)	Hall, 2007
8	кость кита	ИГРАН-3946**	морена	на юго-востоке купола	1046±66	наше исследование
9	кость кита	ИГРАН-3947**	морена	на юго-востоке купола	1012±79	наше исследование
10	мох	ИГРАН-3948**	морена	на юго-востоке купола	824±100	наше исследование
11	мох	ИГРАН-10343**	морена	на западе купола	800±90	наше исследование
12	мох	55-58	морена	на северо-западе морены	1095±30	Веркулич и др., 2012
13	мох	Art-03	морена	на юго-западе морены	1240±80	Heredia Varión et al., 2022

*Номера образцов, место отбора которых показаны на рис. 1; **радиоуглеродное датирование образцов проведено в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН.

произошло выдвигание отдельных языков льда со стороны купола. В это время купол Беллинсгаузена уже, вероятно, был сформирован, поскольку морены возрастом около 600 лет назад перекрывают морену с ледяным ядром, которая, по-видимому, сформировалась ранее. Когда это происходило, можно приблизительно определить по возрасту мхов, найденных на гребнях морен с ледяным ядром. Здесь нет ни одной даты мхов моложе 800 лет назад. Можно предположить, что основное разрастание размеров ледникового купола произошло именно в период с 800 до 600 лет назад. Если это так, то с этого периода по настоящее время размеры купола Беллинсгаузена сильно не уменьшались, оставаясь в пределах контура морены с ледяным ядром и уходя за ее пределы.

Именно период отмирания мхов маркирует то время, когда размеры ледникового купола начали активно расти, его края оказались приморожены, из-за чего и стали формироваться надвиги, образовавшие морену с ледяным ядром и вытащившие на поверхность мох из-под ледника. Систем надвигов

на краю купола довольно много, но только некоторые из них отличались значительными размерами, что, вероятно, маркирует периоды существенной активизации накопления массы и движения льда. Однако впоследствии размеры купола стабилизировались, что, возможно, было связано с некоторым локальным изменением климата.

Активизация движения льда около 600 лет назад сформировала язычок льда, выдвинутый из-за контура морены с ледяным ядром в западном направлении (Hall, 2007), которая, видимо, и заставила автора предположить, что во время МЛП границы купола отодвигались от современных на 400–500 м.

Видимо, похожая активизация движения льда, приведшая к формированию напорной морены, произошла и в восточной части ледникового купола, где небольшой язычок льда спускался в море. Однако подтверждающих дат этой активизации не обнаружено. Похоже, что активизация движения льда в это время затронула только два этих участка купола Беллинсгаузена. Если это так, то такое обстоятельство может свидетельствовать о

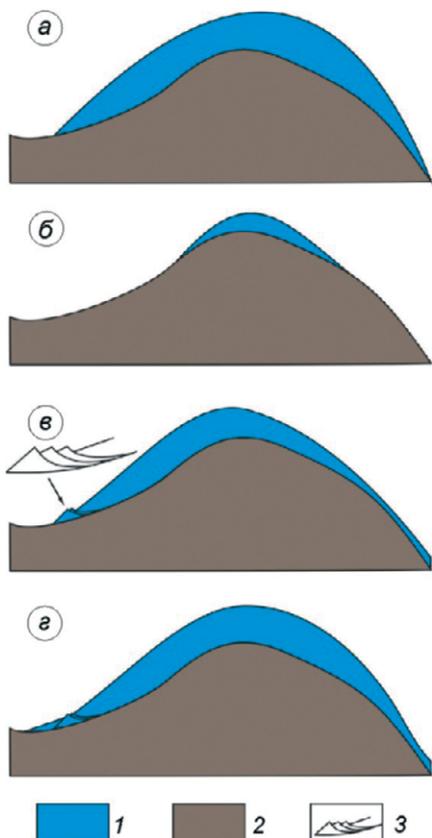


Рис. 2. Стадии изменения купола Беллинсгаузен во времени. *а* – 5000 лет назад, *б* – 2000 лет назад, *в* – 600–800 лет назад, *г* – 300–150 лет назад. 1 – лед, 2 – грунт и порода, 3 – система надвигов на краю купола, по которым на поверхность выносились материалы, примороженные к основанию льда

Fig. 2. Stages of change of the Bellingshausen Dome over time. *a* – 5000 years ago, *б* – 2000 years ago, *в* – 600–800 years ago, *г* – 300–150 years ago. 1 – ice, 2 – ground and rocks, 3 – a system of thrusts on the edge of the dome, along which materials frozen to the base of the ice were carried to the surface

преобладании в этот период ветров ориентации З–В (сейчас преобладают СЗ–ЮВ), из-за чего и возникло накопление массы льда на соответствующих склонах купола, что привело к активизации движения льда именно в этих направлениях.

300 лет назад – настоящее время. Впоследствии стабилизация сменилась новым накоплением массы на куполе Беллинсгаузена. По-видимому, последняя активизация на ледниковом куполе могла произойти около 300–130 лет назад, поскольку мертвый мох именно такого возраста был обнаружен вблизи края ледникового купола (Hall, 2007). Однако эту находку можно интерпретировать по-разному. Можно предположить, что эта находка приурочена к самой западной части языка льда, который мог сформироваться к западу от современного положения края ледникового купола (Hall,

2007). Но, возможно, эта находка не относится к языку льда, а просто мох погиб, когда размеры ледникового купола увеличились во всех направлениях. Подтверждением этого предположения могут быть границы ледникового купола, хорошо различимые на аэрофотоснимках 1956 года, в пределах которых оказывается и точка с обнаруженными мертвыми мхами. Существенно, что разрастание размеров купола Беллинсгаузена на восток выразилось не только в перекрытии льдом всех морен, что говорит о недавнем времени произошедшего, но и выдвигание языка льда в море. К сожалению, напорная морена, возникшая при этой активизации движения льда, не датирована, потому точное время этого события на востоке купола пока установить невозможно.

Сколько времени продолжался этот временной отрезок МЛП, не известно. Известно только, что с 1956 г. размеры купола Беллинсгаузена стали уменьшаться как за счёт понижения поверхности льда, так и за счет сокращения площади купола, в основном, из-за таяния льда вне контура морены с ледяным ядром. Можно предположить, что с момента максимального распространения льда во время МЛП до настоящего времени происходило в основном постепенное уменьшение размеров купола Беллинсгаузена (за исключением возможных непродолжительных похолоданий, таких как похолодание 2009–2016 гг.). Вероятно, такие похолодания могли происходить и в прошлом. Например, краткосрочные похолодания, когда средняя летняя температура воздуха опускалась до нулевых или отрицательных значений, по метеорологическим данным были зафиксировано в регионе в 1948/49, 1958/59 и 1968 гг. (Мавлюдов, 2023). Именно в эти периоды высота границы питания могла опускаться до уровня моря, что приводило к кратковременным увеличениям размеров купола. Однако отсутствие более ранних инструментальных наблюдений не позволяет выделить такие периоды ранее.

О хронологии отступления края льда свидетельствует и строение лестницы ступеней, образованных водными потоками, протекавшими вдоль края льда на склонах рельефа, падающих в направлении края ледникового купола на его западной окраине. На отдельных участках таких ступеней можно насчитать до 80 или более. Если считать их ежегодными, то верхние ступени относятся к 1940-м годам или к более раннему периоду. Об этом же говорят и аэрофотоснимки 1956 и 1983/84 гг., на которых видно, что край ледникового купола постепенно отступал в сторону современных границ морены с ледяным ядром.

После таяния льда вне контура морены с ледяным ядром, которое преимущественно завершилось к 2006 г., уменьшение площади купола стало происходить на участках, где лёд перекрывает морену с ледяным ядром, то есть на западе и востоке

купола. На краю морены с ледяным ядром таяние происходило с малой интенсивностью за счёт брони рыхлых обломочных отложений на льду.

Дополнительным подтверждением цельности и продолжительности этого периода являются данные, полученные при анализе керна скважины, пробуренной на вершине КБ (Jiankang et al., 1999). В керне удалось идентифицировать слои пепла от 1650 г. до настоящего времени, что говорит о том, что в течение этого периода на вершине купола происходило в основном накопление массы. Поскольку скважина не была добурена до ложа КБ, не известно наличие или отсутствие перерывов в накоплении снега ранее, чем 300 лет назад, как, собственно, и точная продолжительность этого периода.

Итак, в течение МЛП можно выделить два этапа: первый более мощный и продолжительный, предположительно 800–300 лет назад, и второй более короткий и, возможно, не менее интенсивный – 300–130 лет назад. В течение первого периода сформировалась морена с ледяным ядром, то есть размеры ледникового купола были близки к современным. Обилие надвигов в морене говорит о том, что накопление массы на куполе было не постоянным, а происходило с некоторыми перерывами. Заходил ли в это время лед за пределы морены с ледяным ядром, не ясно. Но даже если и заходил, то он был перекрыт льдом второго этапа и не оставил собственных следов. После 600 лет назад образовались два языка льда на западе и востоке купола. При этом небольшой западный язык вышел на пределы морены с ледяным ядром. Второй этап, по-видимому, характеризовался более низкими температурами воздуха, из-за чего лёд был менее подвижен, и надвиги на краю купола уже не формировались. Поверхность льда на куполе повысилась, почти сравнявшись с гребнем морены с ледяным ядром. При этом лед распространялся на некоторое расстояние за пределы морены с ледяным ядром. Об этом можно судить по характеру распределения льда в 1956 г.

Однако не исключено, что между первым и вторым этапом наступания ледника мог существовать временной перерыв. На это предположение наводит возраст мертвого мха около 700 лет назад (Hall, 2007), обнаруженный за пределами морены с ледяным ядром. Возможно, в это время край льда отступал до морены с ледяным ядром, что позволило мхам колонизировать эту территорию на короткое время. Отсутствие промежуточных возрастов мха между 700 и 260 лет назад может говорить о том, что все это время территория вокруг купола за пределами морены с ледяным ядром могла быть покрыта снегом и льдом.

Время образования морены с ледяным ядром. Когда сформировалась морена с ледяным ядром –

точно не известно. Маловероятно, чтобы она могла образоваться еще 5000 лет назад и благополучно пережить период потепления климата, продолжавшийся с 4000 до 2000 лет назад, то есть около 2000 лет (Веркулич и др., 2012). Нет никаких подтверждений и того, что морена с ледяным ядром могла сформироваться в период похолодания с 2000 до 1400 лет назад.

Можно предположить, что морена с ледяным ядром могла быть сформирована в самом начале МЛП. Формирование морены с ледяным ядром в середине или конце МЛП маловероятно, о чем свидетельствуют те же аэрофотоснимки 1956 г., где морена с ледяным ядром либо частично выступает из льда или полностью перекрыта им, то есть была сформирована до последующего накопления льда на ней.

Имеющиеся данные говорят о том, что эта морена образовалась в самом начале малого ледникового периода. Доказательством этого служит возраст мха, вытасенного надвигами из-под края сформировавшегося ледникового купола в его юго-восточной части (близ мыса Неблис Поинт), который оказался равен 890 ± 120 лет назад (образец ИГРАН № 3948). Аналогичный возраст был получен для мха, вытасенного по надвигам в западной части ледникового купола, который оказался равен 800 ± 90 лет (образец ИГРАН № 10343); аналогичен и возраст мха, полученный ранее (Hall, 2007). Это значит, что мох произрастал внутри кольца морены с ледяным ядром как раз перед началом МЛП. Из этого следует также, что, вероятно, весь моренный комплекс ледникового купола был сформирован в начале МЛП, а может быть также он подновлялся и в дальнейшем. Поскольку язычок ледника возрастом около 600 лет назад перекрывает морену с ледяным ядром, то время образования этой морены ограничивается периодом между 800–600 лет назад.

Косвенным доказательством того, что морена образовалась во время МЛП, служит также находки костей кита, вытасенных надвигами в морену. Эти кости свидетельствуют о том, что еще около 1000 лет назад в юго-восточной части купола близ Неблис Поинт существовал морской залив, на берег которого был вынесен погибший кит. Это означает, что тогда морены еще не существовало. После осушения залива (возможно из-за гляциоизостатического поднятия) там обильно росли мхи, которые также были вынесены надвигом на морену с ледяным ядром.

Границы ледникового купола во время МЛП. В настоящее время очень мало информации о максимальном распространении границы ледникового купола во время МЛП. Связано это с тем, что на местности явных следов этой границы практически нет. В основном в это время ледниковый

купол распространялся за морену с ледяным ядром за счет преобразования снега в лед при ежегодном накоплении слоя наложенного льда под нетающим снежным покровом. Это привело к тому, что лёд практически или совсем не двигался, будучи при мороженным к ложу. Об этом свидетельствуют мерзлотные кольца, сохранившиеся неподалеку (в десятках метров) от современных внешних границ морены с ледяным ядром, которые были еще перекрыты льдом до 1983 г. А их возраст можно примерно оценить по их диаметру – он составляет около 2000 лет (Jeong, 2006). Поэтому при отступании края такого льда следов ледника в виде конечной морены не оставалось. Именно это и затрудняет проведение максимальной границы купола во время МЛП.

В работе (Hall, 2007) приводится информация о том, что граница ледникового купола в позднем голоцене или, возможно, в течение последних 3500 лет располагалась менее чем в 400–500 м за современным краем ледника. Что понимал автор под краем ледника, в работе не говорится, но, видимо, имелась ввиду внутренняя часть морены с ледяным ядром, которую автор называет мореной «Shetland I». При этом доказательства в статье относятся только к западной части купола – участку расположения язычка льда, вышедшего за пределы морены с ледяным ядром во время МЛП. Граница льда во время МЛП также приведена в работе (Petsch et al., 2020). Авторы проводили границу положения фронта ледника во время МЛП на основании расчета по скорости отступления края льда, базирясь на снимках Landsat от 03.01.1986; 27.02.1988; 28.01.1989; 19.01.2003; 17.03.2015 и 29.04.2018 и предполагая, что отступление края льда происходило равномерно. Хронология датирования и картирование морены с ледяным ядром, которую авторы называют напорной мореной, использовались для интерпретации положения фронта ледника во время МЛП. Авторы этой статьи ошибочно считали морену с ледяным ядром напорной мореной, что, тем не менее, не помешало им провести границу купола во время МЛП на северо-западе по внутренней стороне морены с ледяным ядром, а на западе и юго-западе купола как по внутренней стороне морены с ледяным ядром, так и за пределами такой же морены, отступив от ее внешнего края. При этом даже на аэрофотоснимках 1956 г. хорошо видно, что граница льда располагается повсеместно с внешней стороны морены с ледяным ядром (см. рис. 1).

Какие методы можно использовать для проведения границы купола во время МЛП? Мы пользовались лестницами врезания потоков при отступании края льда, границами распространения озвов и кустистых лишайников, для колонизации которыми требуется от 40 до 100 лет, а может и больше (Харионов, 2009).

Использование всех этих методов показало, что граница максимального распространения льда во время МЛП, видимо, близка к границам льда, видимых на аэроснимках 1956 г., хотя, может быть, и несколько распространялась далее за её пределы. Но поскольку никаких доказательств другой границы максимального распространения льда на куполе Беллинсгаузена в настоящее время не имеется, вероятно, пока, т.е. до получения новых данных, за нее следует принимать границу распространения льда в 1956 г. В этом случае граница распространения льда отстоит от внешнего края морены с ледяным ядром на расстояние от 250 до 600 м (см. рис. 1).

Сравнение с другими ледниками. Ряд исследователей предположил, что самое последнее наступание ледников на Южных Шетландских островах произошло в то же время, что и МЛП в Европе (Birkenmajer, 1979; Curl, 1980; Clapperton, Sugden, 1988). При этом некоторые ученые нашли свидетельства двух отдельных периодов наступания ледников в позднем голоцене на Южных Шетландских островах (Clapperton, Sugden, 1988). Исследования, подобные выполненным Hall (2007), были проведены у мыса Ротера (67° 34' ю.ш.; 68° 07' з.д.) в заливе Маргерит на западе Антарктического полуострова, где авторы пришли к аналогичным выводам (Guglielmin et al., 2016). В исследовании, где при помощи космогенно-изотопного метода для определения возраста ледниковых форм рельефа на острове Джеймса Росс, расположенном к востоку от Антарктического полуострова, получили четыре возраста по ^{10}Be из ряда фронтальных морен в бухте Рам и еще четыре возраста по ^{10}Be из залива Крофт, которые предполагают наступание ледников в течение последних 300 лет (Kaplan et al., 2020). На основании этих и ряда других данных представляется, что наступание ледников во время МЛП и возможное похолодание было широко распространено по всему Антарктическому полуострову с 600–450 до 150 лет назад, т.е. эти события имеют, вероятно, региональный масштаб (del Valle, Tatur, 1993; Simms et al., 2021).

В работе (Simms et al., 2021) получены новые доказательства колебаний ледников в позднем голоцене в трех местах в районе Антарктического полуострова. Морена или слой тиллитов от приливного ледника пересекает ряд поднятых пляжей в Тей-Хед на острове Жоинвиль вдоль северо-западной части моря Уэдделла. В районе Спарк-Пойнт на острове Гринвич Южных Шетландских островов ледник перекрыл поднятые голоценовые пляжи, а морские отложения, содержащие ракушки, превратились в ледниковый диамиктон. Третий участок в заливе Калметт в пределах более крупной морены Маргерит также содержит недавнюю морену, которая пересекает ряд поднятых пляжей. Полученные новые данные о возрасте, ограничивающем

это наступание ледников, в целом согласуются с несколькими другими известными возрастами на моренах и косвенными записями, свидетельствующими о более прохладных условиях на Антарктическом полуострове. Обобщение авторами имеющихся данных дает возраст от 400 до 90 лет назад (1550–1860 гг.; 95%) для МЛП на Антарктическом полуострове. Рассмотрение двухфазного наступания ледников соответствует большему количеству данных со всего Антарктического полуострова и предполагает наступание от 575 до 330 л.н. (1375–1620 гг.) и от 400 до 50 л.н. (1550–1900 гг.). Эти данные в целом согласуются с нашими результатами по куполу Беллинсгаузена за исключением начала разрастания оледенения в период от 800 до 600 лет назад. Однако, видимо, необходимы дополнительные исследования для точного определения возможности многократного наступания ледников во время МЛП. Наблюдающееся сходство времени наступания ледников на Антарктическом полуострове и в Северном полушарии, вероятно, подтверждает предположение о связи похолодания МЛП с общеземными причинами – загрязнением атмосферы вулканическими аэрозолями или падением солнечной активности (Соломина, 2014; Simms et al., 2021). Анализ полученных данных позволяет предположить, что антарктические ледниковые щиты и ледники, возможно, были более чувствительны к прошлым изменениям климата, чем считалось ранее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено изменение ледникового купола Беллинсгаузен на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) в позднем голоцене по имеющимся геоморфологическим и биологическим признакам, а также по данным радиоуглеродного датирования органических остатков, обнаруженных в моренах с ледяным ядром или вне них (мертвые мхи, ракушки и кости кита). Перед началом МЛП ледниковый купол сильно сокращался в размерах, хотя точные размеры сохранившегося поля льда не известны. Малый ледниковый период, вероятно, начался около 600 или 800 лет назад. Первоначально происходило активное накопление снега, что позволило ледниковому куполу увеличиться в размерах примерно до аналогичных современным. Значительное похолодание приморозило края купола, что при увеличении количества снега и некотором потеплении климата заставило лед наползать на примороженные края по надвигам. Поскольку наползающий лед прихватывал примороженные донные отложения, это привело к формированию краевой морены с ледяным ядром. Многократные повторения надвигания материала на края купола привели к разрастанию ширины морены до 300 м, как это видно в северо-западной части купола.

Активизация накопления материала на склонах купола Беллинсгаузена около 600 лет назад привела к формированию двух разнонаправленных язычков льда. Далее, видимо, произошла некоторая стабилизация оледенения.

Второй этап активизации купола Беллинсгаузена произошел позже, вероятно, около 300 лет назад. Для него характерно обширное накопление снега не только на площади купола, но и за внешней границей морены с ледяным ядром, что, скорее всего, говорит о периоде с продолжительной холодной погодой, вероятно, без существенных периодов потеплений. В результате купол Беллинсгаузена рос не только в высоту, но и по площади из-за накопления снега вне контура морены, где лед формировался за счет ежегодного увеличения толщины наложенного льда. В результате лед почти скрыл, а местами перекрыл морену с ледяным ядром, следы чего мы наблюдаем на снимках 1956 г. Это означало, что лед на периферии купола почти не двигался. В результате таяния льда вне контура морены с ледяным ядром происходило отступление края льда, практически не оставляя следов в виде морены. Потому здесь сохранилась ледниковая штриховка и мерзлотные кольца, образованные ранее. В последующем наблюдалось сокращение площади купола Беллинсгаузена преимущественно за счет таяния льда за пределами морены с ледяным ядром.

Выявленное автором участие надвигов в формировании всех морен с ледяным ядром, а также полученные новые даты для мертвого мха и костей кита, вытасченные по надвигам из-под ледникового купола, дополняют данные, полученные другими исследователями. Они позволили по-новому взглянуть на историю изменения размеров купола в позднем голоцене.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы госзадания Института географии РАН “Криосфера в условиях изменяющегося климата” FMWS-2024-0004. Автор приносит благодарность Российской антарктической экспедиции за представленную возможность проведения многолетних исследований на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо).

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment “Cryosphere in a Changing Climate” FMWS-2024-0004 by the Institute of Geography RAS. The author expresses gratitude to the Russian Antarctic Expedition for the opportunity to conduct long-term research on King George (Waterloo) Island.

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. С. 17–28.
- Говоруха Л.С., Симонов И.М. Географические исследования на о. Кинг-Джордж (о. Ватерлоо) // Бюллетень САЭ. 1973. № 85. С. 8–15.
- Заморюев В.В. Результаты гляциологических наблюдений на станции Беллинсгаузен в 1968 году // Тр. Советской Антарктической экспедиции. 1972. Т. 55. С. 135–144.
- Мавлюдов Б.Р. Летний баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 325–342.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422030135>
- Мавлюдов Б.Р. Высота границы питания на куполе Беллинсгаузен, Антарктика // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 4. С. 540–552.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423040117>
- Соломина О.Н. Колебания ледников в голоцене и возможное влияние на них орбитального сигнала, солнечной и вулканической активности и антропогенного воздействия // Лёд и Снег. 2014. 54 (3). С. 81–90.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-81-90>
- Харитонов Н.П. Лишайники и их изучение // Исследователь. Researcher. 2009. № 3–4. С. 182–198.
- Birkenmajer K. Lichenometric dating of glacier retreat at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica) // Bull. Pol. Acad. Sci. Earth Science 1979. V. 27. No. 1–2. P. 77–85.
- 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/Wurt. 2001. 165 p.
- Braun M., Simões J.C., Blindow N., Vogt S., Bremer U.F., Pfender M., Saurer H., Aquino F.E., Ferron F.A. The compilation of a DTM and a new satellite image map for King George Island, Antarctica // Geo-spatial Information Science. 2001. V. 4. No. 2. P. 47–51.
<https://doi.org/10.1007/BF02826977>
- Clapperton C.M., Sugden D.E. Holocene glacier fluctuations in South America and Antarctica // Quaternary Science Review. 1988. V. 7. P. 185–198.
[https://doi.org/10.1016/0277-3791\(88\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0277-3791(88)90005-4)
- Composite Gazetteer of Antarctica (CGA) // Электронный ресурс. <https://scar.org/library-data/maps/cga-composite-gazetteer-of-place-names> Дата обращения: 07.07.2024.
- Curl J.E. A glacial history of the south Shetland islands, Antarctica. Institute of Polar Studies Report. 1980. V. 63. P. 1–129.
- del Valle R., Tatur A. Holocene evolution of landscape and biota on King George Island, Antarctica // Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen, 1993. V. 25. No 2. P. 1128–1130.
<https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900338>
- Evgrafova S.Y., Mavlyudov B.R., Chukmasov P.V., Chetverova A.A., Masyagina O.V. Fossil mosses are emitting methane after maritime Antarctic glacier retreat // Marine Pollution Bulletin. 2024. V. 199. 115959. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115959>
- Guglielmin M., Convey P., Malfasi F., Cannone N. Glacial fluctuations since the «Medieval warm period» at Rothera Point (Western Antarctic Peninsula) // Holocene. 2016. T. 26. No. 1. P. 154–158.
<https://doi.org/10.1177/0959683615596827>
- Hall B.L. Late-Holocene advance of the Collins Ice Cap, King George island, South Shetland Islands // Holocene. 2007. V. 17. No. 8. P. 1253–1258.
<https://doi.org/10.1177/0959683607085132>
- Heredia Barión P., Roberts S.J., Spiegel C., Binnie S.A., Wacker L., Davies J., Gabriel I., Jones V.J., Blockley S., Pearson E.J., Foster L., Davies S.J., Roland T.P., Hocking E.P., Bentley M.J., Hodgson D.A., Hayward C.L., McCulloch R.D., Strelin J.A., Kuhn G. Holocene deglaciation and glacier readvances on the Fildes Peninsula and King George Island (Isla 25 de Mayo), South Shetland Islands, NW Antarctic Peninsula // Holocene. 2023. V. 33, No. 6. P. 636–658.
<https://doi.org/10.1177/09596836231157059>
- Jeong G.Y. Radiocarbon ages of sorted circles on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica // Antarctic Science. 2006. V. 18. № 2. P. 265–270.
<https://doi.org/10.1017/S0954102006000307>
- Jiakang H., Zichu X., Fengnian D., Zhang W. Volcanic eruptions recorded in an ice core from Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica // Annals of Glaciology. 1999. V. 29. No. 1. P. 121–125.
<https://doi.org/10.3189/172756499781821139>
- 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 Planet Science Letter. 2020. V. 534, 116077. P. 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116077>
- Miller G.H., Pendleton S.L., Jahn A., Zhong Y., Andrews J.T., Lehman S.J., Briner J.P., Raberg J.H., Bueltmann H., Reynolds M., Geirsdóttir Á., Southon J.R. Moss kill dates and modeled summer temperature track episodic snowline lowering and ice cap expansion in Arctic Canada through the Common Era // Climate Past. 2023. 19. P. 2341–2360.
<https://doi.org/10.5194/cp-19-2341-2023>
- Orheim O., Govorukha L.S. Present-day glaciation in the South Shetland Islands // Annals of Glaciology. 1982. V. 3. P. 233–238.
<https://doi.org/10.3189/s0260305500002834>

- Pendleton S.L., Miller G.H., Lifton N., Lehman S.J., Southon J., Crump S.E., Anderson R.S.* Rapidly receding Arctic Canada glaciers revealing landscapes continuously ice-covered for more than 40,000 years // *Nature communications*. 2019. V. 10 (1). No. 445. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08307-w>
- Petsch C., da Rosa K.K., 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. P. 1–17.
<https://doi.org/10.14350/ig.60153>
- 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. P. 99–109.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.009>
- Seong Y.B., Owen L.A., Lim H.S., Yoon H.I., Kim Y., Lee Y.I., Caffee M.W.* Rate of late Quaternary ice-cap thinning on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica defined by cosmogenic ³⁶Cl surface exposure dating // *Boreas*, 2008. V. 38. No. 2. P. 207–213.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00069.x>
- Simms A.R., Bentley M.J., Simkins L.M., Zurbuchen J., Reynolds L.C., DeWitt R., Thomas E.R.* Evidence for a “Little Ice Age” glacial advance within the Antarctic Peninsula – Examples from glacially-overrun raised beaches // *Quaternary Science Reviews*. 2021. V. 271. No. 1. 107195. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2021.107195>
- Simões J.C., Goßmann H., Delmas R.J., Moskalevsky M.Yu.* Glaciological research in King George Island: missions and developments in the 1990s // *Pesquisa Antártica Brasileira (Brazilian Antarctic Research)*. 2004. No. 4. P. 1–8.
<https://doi.org/10.31789/pab.v4n1.001>
- Simões C.L., da Rosa K.K., Czapela F.F., Vieira R., Simões J.C.* Collins Glacier retreat process and regional climatic variations, King George Island, Antarctica // *Geographical Review*. 2015. V. 105. No. 4. P. 462–471.
<https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2015.12091.x>
- Sobiech J.D.* Geometry and glacial hydrology of Bellingshausen Dome, King George Island, Antarctica. Results from GPR-measurements. Diplomarbeit im Fach Landschaftsökologie. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität, 2009. 56 p.
- Watcham E., Bentley M., Hodgson D., Roberts S., Fretwell P., Lloyd J., Larter R.D., Whitehouse P.L., Leng M.J., Moreton S.* A new relative sea level curve for the South Shetland Islands, Antarctica // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. No. 21–22. P. 3152–3170.
<https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2011.07.021>
- Wen J., Kang J., Han J., Xie Z., Liu L., Wang D.* Glaciological studies on the King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 1998, 27. P. 105–109.
<https://doi.org/10.3189/1998AoG27-1-105-109>

Citation: *Mavlyudov B.R. Size variations of the Bellingshausen Ice Dome on King George Island (Antarctica) in the Late Holocene. Led i Sneg. Ice and Snow. 2024, 64 (4): 643–657. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424040136*

Size variations of the Bellingshausen Ice Dome on King George Island (Antarctica) in the Late Holocene

B. R. Mavlyudov[#]

Institute of Geography of the RAS, Moscow, Russia

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

Received July 8, 2024 / Revised August 26, 2024 / Accepted October 7, 2024

Based on the data of field studies, dating of dead mosses and analysis of aerial and satellite imagery, the change in the size of the Bellingshausen Ice Dome during the last 5000 years was investigated. During this period the ice dome underwent profound changes from the size close to the present day in the period from 5000 to 4000 years ago under cold climate to significant reduction or even complete disappearance in the period of climate warming from 4000 to 2000 years ago. During the next cooling period from 2000 to 1400 years ago, the dome revived and increased its size to almost its present size, but the warming from 1400 to 600 years ago greatly reduced the size of the dome. It began to increase in size again with the onset of the Little Ice Age. At this time, due to the freezing of ice edges, a complex of moraines with an ice core appeared, girdling the dome along its perimeter. It is not excluded that the main growth of the dome size occurred from 800 to 600 years ago, which is confirmed by the dates of samples collected by the author. The next period of activation occurred after about 300 years ago, when, due to the predominance of westerly and easterly winds, the accumulation of mass resulted in the formation of two small glacial tongues, one of which crossed the ice core moraine in the west of the dome, and the other went into the sea, creating a push moraine in the east. However, the subsequent more uniform accumulation of snow and ice masses on the dome slopes hid the western tongue, increasing the dome size due to the accumulation of ice masses outside the moraine with the ice core. Apparently, the maximum ice spreading was close to that seen on the aerial photographs of 1956. Later the dome size began to decrease and ice outside the moraine with the ice core melted mostly by 2006. Afterwards, the retreat of the ice edge under the moraine cover slowed down and did not exceed 1–2 m/year. At present, there is a decrease of the ice surface at the base of the dome accompanied by ice accumulation at its top.

Keywords: ice cap, glaciation dynamics, ice boundaries, radiocarbon dating

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 in the natural environment on the Fildes Peninsula, King George Island (West Antarctica). *Problemy Arctiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2012, 3: 17–28. [In Russian].
- Govorukha L.S., Simonov I.M.* Geographical studies on King George (Waterloo) Island. *Bulleten' Sovetskoj Antarkticheskoy Expeditsii.* Bulletin of the Soviet Antarctic Expedition. 1973, 85: 8–15. [In Russian].
- Zamoruev V.V.* Results of glaciological observations on Bellingshausen station in 1972. *Trudy Sovetskoj Antarkticheskoy Expeditsii.* Proc. of the Soviet Antarctic Expedition. 1972, 55: 135–144. [In Russian].
- Mavlyudov B.R.* Summer mass balance of the Bellingshausen Ice Dome. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2022, 62 (3): 325–342. <https://doi.org/10.31857/S2076673422030135> [In Russian].
- Mavlyudov B.R.* Equilibrium Line Altitude on the Bellingshausen Dome, Antarctic. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2023, 63 (4): 540–552. <https://doi.org/10.31857/S2076673423040117> [In Russian].
- Solomina O.N.* Holocene glacier variations and their potential orbital, solar, volcanic and anthropogenic forcings. *Ice and Snow.* 2014, 54 (3): 81–90. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-81-90> [In Russian].
- Kharitonov N.P.* Lichens and their study. *Issledovatel'. Researcher.* 2009, 3–4: 182–198. [In Russian].
- Birkenmajer K.* Lichenometric dating of glacier retreat at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland

- Islands, West Antarctica). *Bull. Pol. Acad. Sci., Earth Sci.* 1979, 27 (1–2): 77–85.
- 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/Wurt. 2001: 165 p.
- Braun M., Simões J.C., Blindow N., Vogt S., Bremer U.F., Pfender M., Saurer H., Aquino F.E., Ferron F.A.* The compilation of a DTM and a new satellite image map for King George Island, Antarctica // *Geo-spatial Information Science*. 2001, 4 (2): 47–51. <https://doi.org/10.1007/BF02826977>
- Clapperton C.M., Sugden D.E.* Holocene glacier fluctuations in South America and Antarctica/ *Quaternary Science Review*. 1988, 7: 185–198. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(88\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0277-3791(88)90005-4)
- Composite Gazetteer of Antarctica (CGA)*. Retrieved from: <https://scar.org/library-data/maps/cga-composite-gazetteer-of-place-names>. Last access: July 7, 2024.
- Curl J.E.* A glacial history of the south Shetland islands, Antarctica. Institute of Polar Studies Report. 1980, 63: 1–129.
- del Valle R., Tatur A.* Holocene evolution of landscape and biota on King George Island, Antarctica. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 1993, 25 (2): 1128–1130. <https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900338>
- Evgrafova S.Y., Mavlyudov B.R., Chukmasov P.V., Chetverova A.A., Masyagina O.V.* Fossil mosses are emitting methane after maritime Antarctic glacier retreat. *Marine Pollution Bulletin*. 2024, 199.115959: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115959>
- Guglielmin M., Convey P., Malfasi F., Cannone N.* Glacial fluctuations since the “Medieval warm period” at Rothera Point (Western Antarctic Peninsula). *Holocene*. 2016, 26 (1): 154–158. <https://doi.org/10.1177/0959683615596827>
- Hall B.L.* Late-Holocene advance of the Collins Ice Cap, King George Island, South Shetland Islands. *Holocene*. 2007, 17 (8): 1253–1258. <https://doi.org/10.1177/0959683607085132>
- Heredia Barión P., Roberts S.J., Spiegel C., Binnie S.A., Wacker L., Davies J., Gabriel I., Jones V.J., Blockley S., Pearson E.J., Foster L., Davies S.J., Roland T.P., Hocking E.P., Bentley M.J., Hodgson D.A., Hayward C.L., McCulloch R.D., Strelin J.A., Kuhn G.* Holocene deglaciation and glacier readvances on the Fildes Peninsula and King George Island (Isla 25 de Mayo), South Shetland Islands, NW Antarctic Peninsula. *Holocene*. 2023, 33 (6): 636–658. <https://doi.org/10.1177/09596836231157059>
- Jeong G.Y.* Radiocarbon ages of sorted circles on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Antarctic Science*. 2006, 18 (2): 265–270. <https://doi.org/10.1017/S0954102006000307>
- Jiankang H., Zichu X., Fengnian D., Zhang W.* Volcanic eruptions recorded in an ice core from Collins Ice Cap, King George Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1999, 29 (1): 121–125. <https://doi.org/10.3189/172756499781821139>
- 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 Planet Sci. Lett.* 2020, 534. 116077: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116077>
- Miller G.H., Pendleton S.L., Jahn A., Zhong Y., Andrews J.T., Lehman S.J., Briner J.P., Raberg J.H., Bueltmann H., Reynolds M., Geirsdóttir Á., Southon J.R.* Moss kill dates and modeled summer temperature track episodic snowline lowering and ice cap expansion in Arctic Canada through the Common Era. *Clim. Past*. 2023, 19: 2341–2360. <https://doi.org/10.5194/cp-19-2341-2023>
- Orheim O., Govorukha L.S.* Present-day glaciation in the South Shetland Islands. *Ann. Glaciol.* 1998, 3: 233–238. <https://doi.org/10.3189/s0260305500002834>
- Pendleton S.L., Miller G.H., Lifton N., Lehman S.J., Southon J., Crump S.E., Anderson R.S.* Rapidly receding Arctic Canada glaciers revealing landscapes continuously ice-covered for more than 40,000 years. *Nature communications*. 2019, 10 (1) 445: 1–8 <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08307-w>
- Petsch C., da Rosa K.K., 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: 1–17. <https://doi.org/10.14350/ig.60153>
- 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. P. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.009>
- Seong Y.B., Owen L.A., Lim H.S., Yoon H.I., Kim Y., Lee Y.I., Caffee M.W.* Rate of late Quaternary ice-cap thinning on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica defined by cosmogenic ³⁶Cl surface exposure dating. *Boreas*. 2008, 38 (2): 207–213. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00069.x>
- Simms A.R., Bentley M.J., Simkins L.M., Zurbuchen J., Reynolds L.C., DeWitt R., Thomas E.R.* Evidence for a “Little Ice Age” glacial advance within the Antarctic Peninsula – Examples from glacially-overrun raised beaches. *Quaternary Science Reviews*. 2021, 271 (1). 107195: 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2021.107195>
- Simões J.C., Gofmann H., Delmas R.J., Moskalevsky M.Yu.* Glaciological research in King George Island: missions and developments in the 1990s.

- Pesquisa Antártica Brasileira (Brazilian Antarctic Research). 2004, 4: 1–8.
<https://doi.org/10.31789/pab.v4n1.001>
- Simões C.L., da Rosa K.K., Czapela F.F., Vieira R., Simões J.C.* Collins Glacier retreat process and regional climatic variations, King George Island, Antarctica. *Geographical Review*. 2015, 105 (4): 462–471.
<https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2015.12091.x>
- Sobiech J.D.* Geometry and glacial hydrology of Bellingshausen Dome, King George Island, Antarctica. Results from GPR-measurements. Diplomarbeit im Fach Landschaftsökologie. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität, 2009: 56 p.
- Watcham E., Bentley M., Hodgson D., Roberts S., Fretwell P., Lloyd J., Larter R.D., Whitehouse P.L., Leng M.J., Moreton S.* A new relative sea level curve for the South Shetland Islands, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*. 2011, 30 (21–22): 3152–3170.
<https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2011.07.021>
- Wen J., Kang J., Han J., Xie Z., Liu L., Wang D.* Glaciological studies on the King George Island ice cap, South Shetland Islands, Antarctica. *Ann. Glaciol.* 1998, 27: 105–109.
<https://doi.org/10.3189/1998AoG27-1-105-109>