

Катастрофическая деградация ледника Мелберн (горы Св. Ильи, Канада) в XX – начале XXI века

© 2011 г. Д.А. Петраков¹, С.Г. Эванс², И.Н. Каргаполова^{1, 3}, О.В. Тутубалина¹,
С.С. Черноморец¹, М.С. Шахмина¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

²Университет Ватерлоо, Канада; ³ООО «ЭКОНГинжиниринг», Москва

dpetrakov@gmail.com

Статья принята к печати 13 декабря 2010 г.

Батиметрическая съёмка, горы Св. Ильи, приледниковое озеро, сокращение ледников, цифровая модель рельефа.
Bathymetric survey, digital elevation model, glacier shrinkage, proglacial lake, St. Elias mountains.

На основе анализа топографических карт, космических снимков и полевых наблюдений оценено сокращение ледника Мелберн в горах Св. Ильи (Канада) за последние 100 лет. Площадь ледника за это время сократилась на 75%, а поверхность понизилась более чем на 250 м. Связь между скоростью понижения поверхности ледника и летними температурами воздуха не установлена. Наиболее значительные понижения поверхности отмечались в 1908–1979 гг. на фоне небольшого снижения температуры; фронт ледника при этом медленно отступал. После 1979 г. скорость понижения поверхности ледника уменьшилась более чем вдвое. При этом летняя температура воздуха увеличилась больше чем на 1 °С и возникло глубокое прогляциальное озеро, способствующее активной механической абляции. В последние десятилетия фронт ледника отступил на 17 км, что стало своеобразным рекордом среди ледников Земли, оканчивающихся на суше.

Введение

После окончания малого ледникового периода многие небольшие ледники отступили на сотни метров, а крупные – на первые километры [11]. Однако на Аляске и в приграничных районах Канады (горы Св. Ильи и Береговые хребты) масштабы сокращения ледников были намного больше среднемировых [12, 23], что считают чётким индикатором региональных климатических изменений [15]. Колебания фронта ледника отражают климатический сигнал с опозданием и искажением, а климат непосредственно влияет лишь на объём ледника и высоту его поверхности [10].

Имеется много данных об изменении высоты поверхности ледников Аляски и Канады во второй половине XX в. [4, 5, 13, 17, 21 и др.]. Большинство авторов указывают на рост дегляциации региона за последние 20 лет, объясняя это быстрым повышением (почти на 2 °С) региональной температуры воздуха с 1950-х годов [15]. Вместе с тем анализ длинного ряда по метеостанции Джуно (Аляска) показывает, что за последние 100 лет тенденции явного потепления не наблюдалось. Поэтому столь важны инструментальные данные о понижении поверхности ледников в этом районе с начала XX в., которые лимитируются наличием топографических карт, составленных в первой половине XX в. Авторам известна только одна работа, посвящённая инструментальной оценке изменений высоты поверхности аляскинского ледника с начала XX в. [16].

Топографические карты Международной комиссии по границе (International Boundary Commission, IBC), составленные по материалам съёмки 1906–1912 гг., дают уникальную возможность проследить морфометрические изменения ледников близ границы Аляски (США) и Канады за последние 100 лет. Один из наиболее интересных объектов, показанных на этих картах, – ледниковая система Мелберн–Гранд-Пасифик в горах Св. Ильи (Канада/США). Поведение этих ледников асинхронно: на фоне относительно стабильного состояния ледника Гранд-Пасифик ледник Мелберн быстро сокращался. За последние 30 лет его фронт отступил на максимальную величину среди неприливных (оканчивающихся на суше) ледников Земли – 17 км.

В данной статье мы анализируем изменения морфометрии этих ледников за последние 100 лет и выясняем причины этого. Мы пытаемся также объяснить причины катастрофической деградации ледника Мелберн и сравнить темпы его сокращения в начале и конце XX в.

Характеристика ледников Мелберн и Гранд-Пасифик

Ледники Мелберн и Гранд-Пасифик находятся в области с координатами 59°03' – 59°24' с.ш. и 136°57' – 137°40' з.д. Эта ледниковая система – одна из крупнейших в горах Св. Ильи и самая значительная в бассейне залива Глейшер-Бэй: длина ледника Гранд-Пасифик – 60 км, площадь – 650 км² [15],



Рис. 1. Схема района исследований (фрагмент мозаики космических снимков GoogleEarth).

Красная линия – граница США и Канады; 1 – ледник Мелберн; 2 – ледник Гранд-Пасифик; 3 – перевал Гранд-Пасифик; 4 – ледник Феррис; 5 – ледник Конамохт; 6 – залив Тарр; 7 – хр. Феруэтер; 8 – долина р. Алсек; 9 – оз. Мелберн; 10 – Аляскинский залив

Fig. 1. Location of the study area. Fragment from GoogleEarth satellite imagery.
Red line is Alaska/Canada frontier; 1 – Melbern Glacier; 2 – Grand Pacific Glacier; 3 – Grand Pacific Pass; 4 – Ferris Glacier; 5 – Konamox Glacier; 6 – Tarr Inlet; 7 – Fairweather Range; 8 – Alsek valley; 9 – Melbern Lake; 10 – Alaska Gulf

ширина основной ветви – 2–5 км [7]. Ледники берут начало в обширной общей области питания на высоте до 3000 м в пределах восточного склона хр. Феруэтер, текут оттуда в восточном направлении до перевала Гранд-Пасифик и далее растекаются с него в противоположные стороны. Ледник Мелберн течёт на северо-запад, по направлению к долине р. Алсек, а ледник Гранд-Пасифик – на юго-юго-восток, в сторону залива Тарр, части залива Глейшер-Бэй (рис. 1).

Языки обоих ледников располагаются в хорошо выраженной глубокой продольной депрессии между хр. Феруэтер и водораздельным хребтом гор Св. Ильи, поэтому принимают ряд притоков с этих хребтов. Крупнейший приток Гранд-Пасифика – ледник Феррис длиной около 28 км; длина бывшего (до конца XX в.) крупнейшего притока ледника Мелберн – ледника Конамохт – около 20 км. Ледник Гранд-Пасифик оканчивается в глубоководном заливе Тарр, а ледник Мелберн ещё 30 лет назад оканчивался на суше. В конце 1970-х годов расстояние от перевала Гранд-Пасифик до фронта ледника Мелберн составляло 37 км, а до фронта Гранд-Пасифика – 19 км. Сейчас ледник Мелберн оканчивается в большом прогляциальном озере, расположенном на высоте 250 м над ур. моря. Расстояние от фронта ледника Мелберн до перевала Гранд-Пасифик сократилось на 17 км.

Сведения о колебаниях ледника Гранд-Пасифик в XIX–XXI вв. приведены в нескольких работах [6, 8,

13, 15, 20], а о колебаниях ледника Мелберн – только в публикациях [7, 8]. В работе [8] дана лишь ссылка на исследование [7], а новых данных по леднику Мелберн не приводится. В XVIII – начале XX вв. ледник Гранд-Пасифик отступил более чем на 100 км [6], в то время как ледник Мелберн сократился незначительно. Судя по картам Международной комиссии по границе, в 1908 г. фронт ледника Мелберн располагался близ морены малого ледникового периода. На фототеодолитных снимках той же комиссии, опубликованных в [7], видно, что правая часть языка ледника была сложена замороженным льдом без явных признаков движения, а активный фронт ледника Мелберн сложен льдом Конамохста.

В начале XX в. ледник Гранд-Пасифик продолжал быстро отступать и с 1907 по 1925 г. сократился более чем на 6 км [6], причём свыше 2 км из этого отступления произошли за два месяца 1912 г. [20]. После этого фронт ледника переместился на территорию Канады, но уже через год снова пересёк границу Аляски. К 1925 г. ледник Гранд-Пасифик вновь отступил, правда, в дальнейшем его деградация прекратилась. С 1925 по 1948 г. ледник Гранд-Пасифик продвинулся вперёд на 2 км, а с 1948 по 1978 г. – ещё на 1 км [6]. С 1978 по 1986 г. ледник отступил на 0,8 км [8]. Фронт ледника Мелберн с 1908 г. до конца 1970-х годов медленно отступал. С 1979 по 1987 г. в средней части языка сформировалось озеро длиной 7 км, подпруженное ледяной плотиной ледника Конамохста [7].

Материалы и методы исследований

Исследование изменений ледников Мелберн и Гранд-Пасифик велось преимущественно по разновременным картографическим и аэрокосмическим материалам: 1) топографической карте масштаба 1:250 000, составленной под эгидой Международной комиссии по границе в 1908 г. на район американо-канадской границы по материалам фототеодолитных съёмок; 2) канадской государственной топографической карте масштаба 1:50 000, составленной по материалам аэрофотосъёмки 1979 г.; 3) цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной по топографическим картам масштаба 1:50 000, составленным по материалам аэрофотосъёмки 1987 г.; 4) ЦМР, составленной на основе радиолокационной интерферометрической съёмки с космического корабля «Эндевор» (SRTM) в 2000 г.; 5) цифровых многозональных космических снимков Landsat TM 1992 г., Landsat ETM+ 1999, 2001 и 2002 г., Terra ASTER 2003 г. из архивов Геологической службы США; SPOT HRVIR 2006 г. из Канадского государственного архива геоданных (<http://www.geobase.ca>).

На подготовительном этапе все материалы были приведены в единую систему координат. Основой служила система координат Канадской государственной топографической карты 1979 г. масштаба 1:50 000: универсальная поперечная проекция Меркатора (UTM), зона 8; референц-эллипсоид Кларка 1866 г., северо-американская система координат 1927 г. (NAD27). При ручном дешифрировании космических снимков были построены карты контуров ледника и оз. Мелберн на разные даты. По этим картам определялись значения колебаний фронта и площади ледников. Линейные ошибки для чётких контуров по карте 1908 г. составляют 75 м, по карте 1979 г. и ЦМР 1987 г. — 15 м. Ошибка определения площади ледника по карте 1908 г. составляет около 4%, или 7 км², по остальным материалам — не более 2%.

Для вычисления изменений объёма льда использовалась ЦМР, составленная по карте 1908 г. на основе оцифровки горизонталей, а также существующие ЦМР 1987 и 2000 гг. Предварительно оценены достоверность источников и максимальная погрешность. Чтобы оценить достоверность карты 1908 г., были сопоставлены высоты на участках близ горных вершин, которые не изменились. Установлено, что точность плановой привязки карты 1908 г. к карте 1979 г. составляет около 150 м. Это означало, что оценивать достоверность карты на горных участках, где высота резко меняется, нельзя. Поэтому достоверность карты оценивалась по данным о высоте местности в широких выровненных долинах рек Татшеншины и Алсек. По данным 30 точек контроля разница высот между картой 1908 и ЦМР 1987 г. на

исследованных участках составила 10 м. Кроме того, для некоторых высокогорных участков на карте 1908 г. выявлены значительные ошибки, предположительно связанные с труднодоступностью территории и недостатком съёмочных материалов. Эти участки исключали из анализа.

Достоверность ЦМР 1987 и 2000 гг. также оценивалась на основании исследования неизменившихся элементов. Точки выбирались на относительно ровной поверхности. Наибольшие расхождения в высотах обнаружены на крутых горных склонах, что предположительно объясняется погрешностями привязки, но в среднем по территории они составили около 5 м. Таким образом, суммарная погрешность определения изменений высоты поверхности с 1908 по 2000 г. может достигать 15 м.

При полевых работах, выполненных здесь авторами в августе 2008 г., проведена батиметрическая съёмка оз. Мелберн, уточнены высоты морен малого ледникового периода и современное положение фронта ледника, привязаны имевшиеся у нас космические снимки. Батиметрическая съёмка велась двухлучевым эхолотом Lowrance 525 CF, совмещённым с GPS-приёмником, с борта гребной надувной лодки. Точность измерений глубины в диапазоне 10–300 м составляет 1%; погрешность определения плановых координат — около 10 м. Полученные эхограммы преобразованы в набор более чем 36 тыс. точек с координатами *x*, *y*, *z*. Батиметрическая съёмка проведена на 2/3 озера. Поскольку рельеф дна озера довольно однообразен, полученные данные экстраполировались на всю площадь озера. Объём озера рассчитывался в геоинформационном пакете ESRI ArcView 3.2. Точность определения объёма озера — 10%. Изменения объёмов льда вычислялось путём наложения разновременных поверхностей в ESRI ArcView 3.2.

Для выявления тенденций изменения климата в районе исследований из общедоступных архивов (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov>, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> и <http://pajk.arh.noaa.gov/cliMap/akClimate.php>) были взяты данные по температуре, осадкам холодного периода и твёрдым осадкам с двух ближайших метеостанций: Якутат (135 км) и Джуно (190 км). Непрерывный ряд значений температуры по станции Джуно начинается с начала XX в., а по станции Якутат — с 1941 г; по осадкам — с 1944 и 1949 гг. соответственно. Между среднемесячными температурами тёплого (май–октябрь) периода на обеих станциях существует статистически значимая связь ($R = 0,78$).

Результаты

В последние 100 лет ледник Мелберн быстро деградировал. С 1908 по 2000 г. высота поверхности ледника понизилась в среднем на 300 м. Максимальное понижение поверхности приурочено к средней

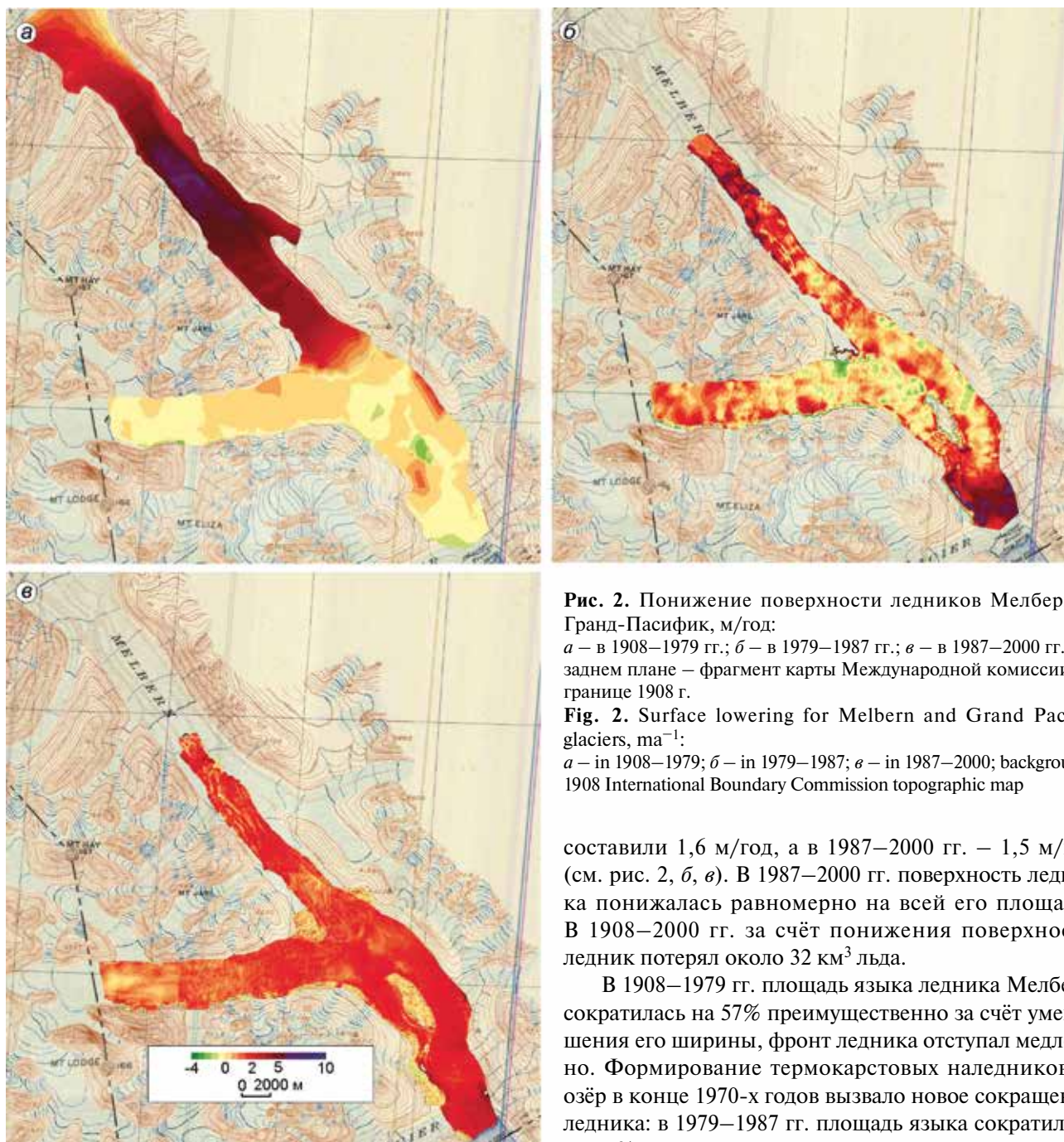


Рис. 2. Понижение поверхности ледников Мелберн и Гранд-Пасифик, м/год:

a – в 1908–1979 гг.; *б* – в 1979–1987 гг.; *в* – в 1987–2000 гг.; на заднем плане – фрагмент карты Международной комиссии по границе 1908 г.

Fig. 2. Surface lowering for Melburn and Grand Pacific glaciers, m a^{-1} :

a – in 1908–1979; *b* – in 1979–1987; *c* – in 1987–2000; background: 1908 International Boundary Commission topographic map

составили 1,6 м/год, а в 1987–2000 гг. – 1,5 м/год (см. рис. 2, б, в). В 1987–2000 гг. поверхность ледника понижалась равномерно на всей его площади. В 1908–2000 гг. за счёт понижения поверхности ледник потерял около 32 км^3 льда.

В 1908–1979 гг. площадь языка ледника Мелберн сократилась на 57% преимущественно за счёт уменьшения его ширины, фронт ледника отступал медленно. Формирование термокарстовых наледниковых озёр в конце 1970-х годов вызвало новое сокращение ледника: в 1979–1987 гг. площадь языка сократилась на 33%, а фронт отступил на 12,5 км. Близ фронтальной морены малого ледникового периода сохранилась часть языка длиной 3,5 км (рис. 3), которая получала лёд в основном за счёт ледника Кономакст. От ледника Мелберн её отделяло прогляциальное озеро длиной 7 км. С 1987 по 2008 г. площадь этого ледника сократилась ещё на 20%, а фронт отступил на 6,5 км. Скорость отступления в разные периоды варьировала от 90 до 350 м/год (см. рис. 3).

Поведение ледника Гранд-Пасифик резко отличалось от поведения ледника Мелберн: если в 1908–1979 гг. поверхность ледника Гранд-Пасифик практи-

части языка в границах 1908 г. и превышает 500 м (рис. 2). Хорошо видно, что область заметного понижения поверхности начинается на леднике Мелберн практически сразу от ледораздела с ледником Гранд-Пасифик. Наибольшая скорость понижения поверхности – 3,7 м/год отмечалась в 1908–1979 гг. (см. рис. 2, а). Максимальные темпы понижения поверхности превышали 7 м/год и наблюдались в средней части языка в границах 1908 г. В дальнейшем темпы понижения заметно сократились и в 1979–1987 гг.

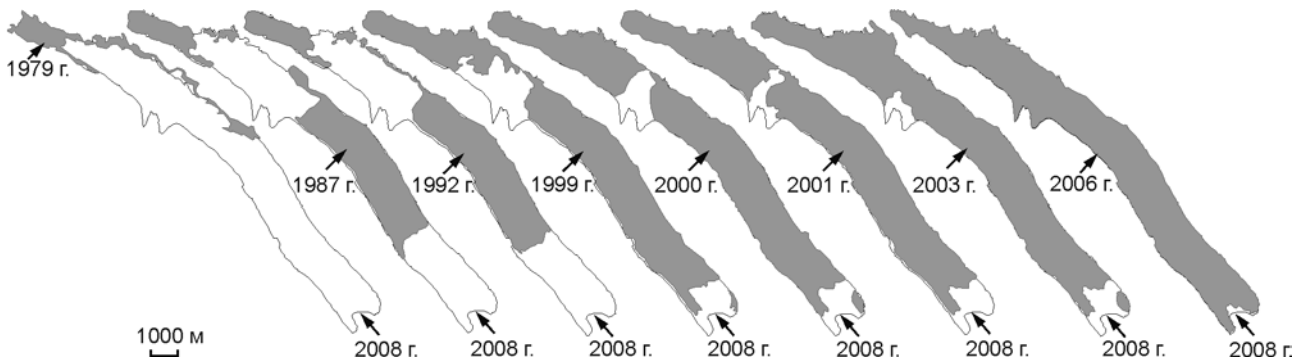


Рис. 3. Изменения размеров оз. Мелберн в 1979–2008 гг.

Серым цветом показана площадь озера в различные года, черной линией – берег озера в 2008 г.

Fig. 3. Change of Melbern Lake coastline in 1979–2008.

Grey color represents lake area in different years, black line – lake coastline in 2008

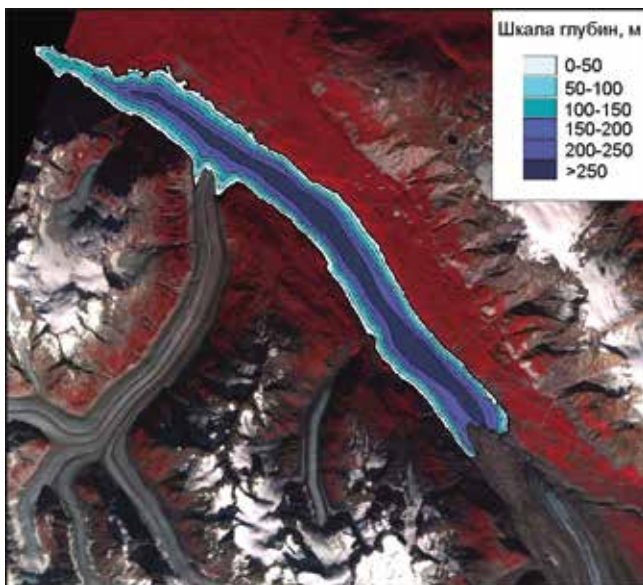


Рис. 4. Батиметрическая карта оз. Мелберн, 2008 г.

На заднем плане – спутниковый снимок SPOT HRVIR 2006 г.

Fig. 4. Bathymetric map of Melbern Lake in 2008.

Background: SPOT HRVIR satellite image (2006)

чески не понижалась, то в 1987–2000 гг. скорость понижения поверхности стала больше скорости понижения поверхности ледника Мелберн (см. рис. 2).

Площадь оз. Мелберн на основе космического снимка SPOT 2006 г. и собственных полевых данных составляет 28,6 км² при длине около 19 км и ширине 1,5 км. Динамика разрастания озера показана на рис. 4. В 1979 г. между мореной малого ледникового периода и фронтом ледника находилось озеро длиной около 2 км. В средней части ледника прослеживалось несколько небольших наледниковых озёр [7]. Наибольшие темпы разрастания озера отмечались в 1979–1987 и 1992–2000 гг. (см. рис. 4). Объём озера в августе 2008 г. достиг 4,3 км³. Средняя глуби-

на озера в измеренной части составляла 165 м, а по всему озеру – 150 м. Подводная долина представляет собой типичный трог с максимальной глубиной в осевой части чуть менее 300 м (см. рис. 4). Дно озера в осевой части покрыто толстым слоем ила, а подводные склоны долины свободны от него. Близ фронта ледника глубина воды уменьшается незначительно, что имеет важное значение для объяснения современных колебаний ледника Мелберн.

В 1979–2008 гг. за счёт формирования озера ледник Мелберн потерял вдвое больше льда, чем за счёт понижения поверхности. Всего с 1908 по 2000 г. ледник потерял около 36 км³ льда из-за понижения поверхности, сокращения площади и формирования прогляциального озера.

Обсуждение результатов

О вкладе изменений климата в сокращение ледника Мелберн. Региональное потепление на Аляске и в сопредельных районах Канады началось после окончания малого ледникового периода и особенно интенсивно идёт в последние десятилетия. С 1949 по 2004 г. среднегодовая температура, рассчитанная по 19 метеорологическим станциям Аляски, увеличилась на 1,9 °С, причем 75% этого потепления приходится на период до 1977 г. [15]. Сходная картина в это время наблюдалась и на метеостанциях Джуно и Якутат, расположенных недалеко от ледника Мелберн. Большинство авторов [13, 15 и др.] отмечают увеличение осадков в холодный период на юго-востоке Аляски с конца 1940-х годов. Судя по данным <http://raj.k.arh.noaa.gov/cliMap/akClimate.php>, это же наблюдается на метеостанциях Якутат (рост на 20%) и Джуно (рост на 30%). Однако на фоне роста зимних осадков на этих же метеостанциях прослеживается сокращение количества выпадающего снега: на 35% в Якутате и на 10% в Джуно. Учитывая этот факт, а также низкое расположение ледника Мелберн,

можно предположить, что явного тренда изменений аккумуляции на языке этого ледника не наблюдается. В области питания ледников Мелберн и Гранд-Пасифик аккумуляция, судя по всему, должна была бы возрастать. На это указывает и рост высоты поверхности, отмечаемый в верхней части области питания этих ледников в 1948–2000 гг. [13].

Большинство региональных исследований объясняют понижение поверхности ледников Аляски в XX в. изменениями температуры после 1948–1949 гг. [13, 15, 16]. Данные об изменениях климата в первой половине XX в. при этом не учитываются. Анализ длинного ряда по метеостанции Джуно показывает, что тенденция потепления за весь XX в. выражена не столь отчётливо, как во второй его половине (рис. 5). Статистически значимый тренд отсутствует, а рост среднегодовой температуры с начала XX в. составляет всего 0,2 °С. Температура тёплого (май–октябрь) периода за то же время увеличилась на 0,8 °С, что при расчёте по формуле Кренке–Ходакова даёт увеличение годовой абляции на 17%. Температурный рост не был однороден. Если с начала XX в. до середины 1940-х годов температура была квазистабильна, то затем, до середины 1970-х годов, шло похолодание, а потом – отчётливо выраженное потепление. С середины 1970-х годов температура периода абляции, по данным обеих станций, повысилась более чем на 1,2 °С, что должно было бы привести (при расчёте по формуле Кренке–Ходакова) к росту поверхностной абляции на языках ледников на 25%. В 1908–1979 гг. и среднегодовая температура, и температура тёплого периода, по данным метеостанции Джуно, понижались незначительно. За это же время поверхность ледника Мелберн понизилась в среднем на 230 м, что диссонирует с тенденцией к снижению температуры. Подобное понижение поверхности ледника должно было увеличить поверхностную абляцию на 30%. Несмотря на это темпы понижения поверхности после 1979 г. выросли более чем вдвое. Что же вызвало такую реакцию ледника Мелберн?

О вкладе динамических изменений в состояние ледников системы Мелберн–Гранд-Пасифик. Анализ карт Международной комиссии по границе показывает, что в 1908 г. основную роль в питании ледника Мелберн играли его боковые притоки. Судя по конфигурации срединных морен, роль основной ветви, текущей с перевала Гранд-Пасифик, была тогда незначительна и составляла не более 20%. В 1908 г. уклон поверхности ледника Гранд-Пасифик в сторону залива Тарр был намного больше, чем уклон поверхности ледника Мелберн. В 1750 г. фронт ледника Гранд-Пасифик проходил на 100 км дальше от перевала, чем в 1908 г. [6]. Напорные морены ледника Мелберн находятся недалеко от его фронта 1908 г. Судя по всему, 260 лет назад продольный уклон по-

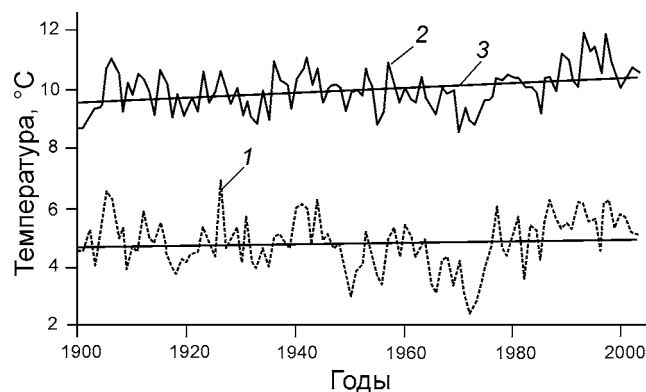


Рис. 5. Ход среднегодовой (1) и средней по периоду абляции (2) температуры воздуха и их линейные тренды (3) на метеостанции Джуно в 1900–2004 гг.

Fig. 5. Mean annual (1) and ablation period (2) air temperature and their linear trends (3) in Juneau in 1900–2004

верхности ледника Мелберн был больше, чем у ледника Гранд-Пасифик, и основная масса льда с одноимённого перевала текла именно в ледник Мелберн. Вероятно, фронт ледника продвигался вниз по долине, где происходило взаимное подпруживание льда притоков и основной ветви ледника. Сокращение питания ледника Гранд-Пасифик за счёт перестройки ледораздела могло быть одним из факторов его катастрофического отступления в 1750–1920 гг. По мере отступления ледника Гранд-Пасифик уклон его поверхности увеличивался, а питание основной ветви ледника Мелберн сокращалось. В начале 1920-х годов, видимо, этот процесс достиг апогея. В результате ледник Мелберн превратился в массу, по сути, мёртвого льда, лежащего ниже границы питания. Поверхность же ледника Гранд-Пасифик, перехватившего основной поток льда, понижалась очень медленно (см. рис. 2, а).

Среднее по леднику Мелберн значение абляции, вычисленное по формуле Кренке–Ходакова [2], в 1908–1979 гг. должно было составлять около 7,2 м в слое льда в год. В этот же период поверхность ледника понижалась со средней скоростью 3,7 м/год, а на отдельных участках – со скоростью более 7 м/год. Оценить аккумуляцию на леднике Мелберн проблематично из-за недостатка гляциологической и метеорологической информации. Отметим, что недалеко находятся объекты масс-балансовых наблюдений – ледники Лемон Крик и Таку, однако данные по аккумуляции снега на них отсутствуют [9]. Аккумуляция на леднике Маласпина, открытом для переноса влаги, в первую половину многоснежной зимы 1999/2000 г. составила 1000–2000 мм водного эквивалента [17] в схожем с ледником Мелберн диапазоне высот. Вертикальный градиент аккумуляции в диапазоне высот 0–1000 м составлял 180 мм/100 м, а

аккумуляция снега на уровне моря – 600 мм. Среднее количество осадков в холодный период по метеостанции Якутат равно около 1700 мм, а по Джуно – около 600 мм. Грубая оценка средней по леднику Мелберн аккумуляции составляет 1500 мм в слое воды, или 1700 мм в слое льда, что близко к данным из Атласа снежно-ледовых ресурсов мира [1]. Приток льда с боковых притоков после 1908 г. компенсировал не более $\frac{1}{4}$ абляции ледника Мелберн и был явно недостаточен для поддержания его существования. В средней части ледника движение льда, по-видимому, не происходило. Продолжавшееся весь XX в. отчленение боковых притоков способствовало дальнейшей деградации ледника. Таким образом, в данном случае следует говорить о приоритете динамической реакции ледника в изменении его объёма. В результате перестройки ледораздела приток льда из области питания нарушился, что вызвало последующее понижение поверхности языка, которое, в свою очередь, привело к отступанию фронта.

В конце XX в. отмечаются некоторые признаки роста питания ледника Мелберн с перевала Гранд-Пасифик. В 1992–2006 гг. петля срединной морены продвигалась вниз по леднику Мелберн со скоростью 150 м/год, но, скорее всего, этот процесс начался раньше. Увеличение притока льда косвенно подтверждается снижением темпов понижения поверхности ледника Мелберн после 1979 г., несмотря на неблагоприятные климатические тенденции. Отметим, что темпы понижения поверхности ледника Гранд-Пасифик в это время возросли, хотя в области питания отмечался рост аккумуляции снега.

О вкладе озера Мелберн в сокращение ледника

Важное значение в сокращении ледника Мелберн после 1979 г. начинает играть озеро. Его большая глубина близ фронта ледника способствует интенсивному отколу айсбергов. Мы оценили скорость отступления фронта ледника Мелберн за счёт откола айсбергов по эмпирической формуле К. Варрена и М. Киркбрайда [22] для ледников, оканчивающихся в озёрах. Полученное значение составило 250 м/год. Таким образом, отступление фронта ледника Мелберн после 1987 г. объясняется исключительно влиянием глубокого озера.

Какой ледник сокращается быстрее всех? Существует не так много примеров такого быстрого сокращения ледников в последние десятилетия. Максимальные отступления горных ледников наблюдаются в настоящее время на Аляске и в Кордильерах Канады, в Патагонии и Новой Зеландии. На Аляске максимальные отступления ледников составляют: 17 км – ледник Тиндаль (1960–1990 гг.); 15 км – ледник Колумбия (с 1979 г. по настоящее время); 10,7 км – ледник Беринг (1967–1993 гг.) [14]. Первые два ледника относятся к

приливным, а ледник Беринг отступил после подвижки. По данным М. Ании [3], в Патагонии в 1944/45–1995/96 гг. больше всего отступил ледник О’Хиггинс – 14 км; по другим данным [18], этот ледник сократился за то же время на 11,2 км. В 1945–2005 гг. в Патагонии максимальная величина отступления фронта (12,2 км) зафиксирована на леднике Маринелли в ледяном поле Кордильеры Дарвин [14].

Схожие с ледником Мелберн процессы наблюдаются в настоящее время на леднике Тасмана в Новой Зеландии. Здесь в 1980-е годы в результате слияния небольших наледниковых озёр на языке ледника стало формироваться крупное прогляциальное озеро. В 2003 г. его площадь составила 3,7 км² [19], а в 2008 г. она уже была равна 14 км² при длине 7 км [24]. Ожидается, что длина этого озера достигнет 16 км. Однако за последние 30 лет именно ледник Мелберн демонстрировал наибольшее отступление среди любых других ледников, не относящихся к категории приливных.

Заключение

Топографические карты Международной комиссии по границе, составленные по материалам съёмки 1908 г., отражают морфометрию ледников близ границы Аляски и Канады в начале XX в. Сопоставив их с современными картами, цифровой моделью рельефа и космическими снимками, мы определили темпы деградации ледника Мелберн за 1908–2008 гг. и сопоставили их с изменениями климата. За последние 100 лет площадь ледника Мелберн сократилась на 75%, а поверхность понизилась более чем на 250 м. Наибольшие темпы понижения поверхности отмечались в 1908–1979 гг., фронт ледника в этот период отступал слабо. После 1979 г. темпы понижения поверхности ледника сократились более чем вдвое. Это происходило на фоне роста летних температур воздуха более чем на 1 °С и формирования глубокого прогляциального озера, способствующего активной механической абляции. Отсутствие связи между скоростью понижения поверхности ледника и температурой тёплого периода, видимо, обусловлено изменением характера поступления льда на языки ледников Мелберн и Гранд-Пасифик из общей области питания. Реакция ледника Мелберн на длительное понижение поверхности – катастрофически быстрое отступление его фронта. После 1979 г. он отступил на 17 км. Это – максимальное в последние десятилетия значение для ледников Земли, оканчивающихся на суше.

Благодарности. Мы признательны администрации Национального парка Татшеншини-Алсек за оперативную выдачу разрешения на исследования в парке и компании Trans-North Helicopters (Уайтхорс) за предоставленный вертолёт, без которого полевые работы были бы невозможны.

Работы выполнены при поддержке: программы «Наука для мира», проект 982143; проектов РФФИ 09-05-00934, 07-05-00172 и 06-05-64787; проекта 8335-07 Национального географического общества (США); проектов НШ-3271.2010.5, НШ-3405.2010.5 Программы поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 492 с.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
- Aniya M. Recent glacier variations of the Hielo Patagonicos, South America, and their contribution to sea-level change // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 1999. V. 31, № 2. P. 165–173.
- Arendt A.A., Echelmeyer K.A., Harrison W.D., Lingle C.S., Valentine B. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level // Science. 2002. № 297. P. 382–386.
- Arendt A., Echelmeyer K., Harrison W., Lingle C., Zirnheld S., Valentine V., Ritchie B., Druckenmiller M. Updated estimates of glacier volume changes in the western Chugach Mountains, Alaska, and a comparison of regional extrapolation methods // Journ. of Geophys. Research. 2006. № 111. F03019; doi:10.1029/2005JF000436
- Carlson P.R., Wheeler M.C., Molnia B.F., Post A., Powell R.D. Maps showing post-neoglacial sediment thickness and bathymetry in Tarr Inlet, Glacier Bay, Alaska. 1983.
- Clague J.J., Evans S.G. Historic retreat of Grand Pacific and Melbern Glaciers, Saint Elias Mountains, Canada – An analogue for decay of the Cordilleran ice sheet at the end of the Pleistocene? // Journ. of Glaciology. 1994. V. 40. № 134. P. 205–210.
- Clarke G.K.C., Holdsworth G. Glaciers of Canada. Glaciers of the St. Elias mountains // U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–j–1. 2002. 31 p.
- Fluctuations of Glaciers 2000–2005: V. IX. Zürich: World Glacier Monitoring Service, 2008. 266 p.
- Haeblerli W., Hoelzle M. Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps // Annals of Glaciology. 1995. № 21. P. 206–212.
- Hoelzle M., Haeblerli W., Dischl M., Peschke W. Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes // Global and Planetary Change. 2003. № 36. P. 295–306.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2007. 996 p; http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wgl/en/contents.html
- Larsen C.F., Motyka R.J., Arendt A.A., Echelmeyer K.A., Geissler P.E. Glacier changes in southeast Alaska and northwest British Columbia and contribution to sea level rise // Journ. of Geophys. Research. 2007. № 112. F01007; doi: 10.1029/2006JF000586
- Lopez P., Chevallier P., Favier V., Pouyau B., Ordenes F., Oerlemans J. A regional view of fluctuations in glacier length in Southern South America // Global and Planetary Change. 2010. V. 71. № 1–2. P. 85–108; doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.12.009
- Molnia B.F. Late nineteenth to early twenty-first century behavior of Alaskan glaciers as indicators of changing regional climate // Global and Planetary Change. 2007. № 56. P. 23–56.
- Motyka R.J., O'Neel S., Connor C., Echelmeyer K.A. 20th century thinning of Mendenhall Glacier, Alaska, and its relationship to climate, lake calving, and glacier run-off // Global and Planetary Change. 2002. V. 35. P. 93–112.
- Muskett R.R., Lingle C.S., Tangborn W.V., Rabus B.T. Multi-decadal elevation changes on Bagley Ice Valley and Malaspina Glacier, Alaska // Geophys. Research Letters. 2003. V. 30. № 16; 10.1029/2003GL017707
- Rivera A., Casassa G., Acunia C., Lange H. Variaciones recientes de glaciares en Chile // Invest. Geogr., Chile. 2000. P. 29–60.
- Röhl K. Characteristics and evolution of supraglacial ponds on debris-covered Tasman Glacier, New Zealand // Journ. of Glaciology. V. 54. № 188. 2008. P. 867–880.
- Tarr R.S., Martin L. Alaskan Glacier Studies of the National Geographic Society in the Yakutat Bay, Prince William Sound and Lower Copper River Regions // National Geographic Society. Washington, D.C., 1914. 498 p.
- VanLooy J., Forster R., Ford A. Accelerating thinning of Kenai Peninsula glaciers, Alaska // Geophys. Research Letters. 2006. № 33. L. 21307; doi:10.1029/2006GL028060
- Warren C.R., Kirkbride M.P. Calving speed and climatic sensitivity of New Zealand lake-calving glaciers // Annals of Glaciology. 2003. № 36. P. 173–178.
- Zemp M., Roer I., Kääb A., Hoelzle M., Paul F., Haeblerli W. Global glacier changes: facts and figures. WGMS. UNEP Publishing. 2008. 45 p. www.terranature.org/TasmanGlacierRetreat.htm – Tasman Glacier retreat is extreme.

Summary

Using a number of topographic maps, satellite images and fieldwork data, we have analyzed change of Melbern Glacier (St. Elias, Canada) in last 100 years. During this period Melbern Glacier area has been decreased by 75%, whereas surface elevation lowered more than 200 m. We identified no relation between warm period air temperatures and glacier surface lowering rate. The highest rate of surface lowering was observed in 1908–1979, when air temperature decreased slightly and terminus recessed slowly. After 1979 the rate of surface lowering reduced more than twice despite evident (more than 1 °C) growth of summer temperature accompanied by formation of deep proglacial lake provoking high rate of ice loss. Melbern Glacier terminus has retreated 17 km and demonstrated highest recession rate among non-tidewater glaciers of Earth in recent decades.