

Изменения горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет

© 2017 г. В.М. Котляков, Л.П. Чернова*, А.Я. Муравьев, Т.Е. Хромова, Н.М. Зверкова

Институт географии РАН, Москва, Россия

*ludmila.chernova@gmail.com

Changes of mountain glaciers in the Southern and Northern Hemispheres over the past 160 years

V.M. Kotlyakov, L.P. Chernova*, A.Ya. Muraviev, T.E. Khromova, N.M. Zverkova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*ludmila.chernova@gmail.com

Received February 25, 2017

Accepted June 13, 2017

Keywords: *glaciation area, glacier dynamics, glaciological databases, mountain glaciers.***Summary**

Changes of the glacier areas were analyzed. Rates of the area reduction of glaciers and glacier systems were compared over the course of the past 160 years as well as during shorter time intervals for the same period. On average for the whole period, the glacier areas decreased by a few tenths of a percent from the original in a year. Note, that this value was formed by rates for periods of the glacier retreating and advancing which were comparable by their intensities with rates from tenths of a percent to several percents of area in a year. In the first and the last thirds of the 20th century, when a rise of the air temperature decelerated, a number of advancing glaciers increased in both hemispheres. During these periods the same glaciers advanced (up to 25% of the total quantity of the investigated glaciers in the Alps). The second third of the 20th and the beginning of the 21st century were characterized by intensification of the temperature rise, and as the consequence of that, the number of advancing glaciers decreased, and rates of the area reductions increased over the whole globe. This dynamics was in a good agreement with the sea ice fluctuations in both, the Arctic and Antarctic regions, where the ice coverage increased in the 1960–1970 and in the second tenth of XXI century. So, deceleration of the climate warming in that time was followed by increasing of the Arctic and Antarctic sea ice coverage and by deceleration of the area reduction of the mountain glacierization in some regions.

Citation: Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Khromova T.E., Zverkova N.M. Changes of mountain glaciers in the Southern and Northern Hemispheres over the past 160 years. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (4): 453–467. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467

Поступила 25 февраля 2017 г.

Принята к печати 13 июня 2017 г.

Ключевые слова: *горные ледники, базы гляциологических данных, динамика ледников, площадь оледенения.*

Исследованы скорости перемещения фронта и изменения площади ряда ледников за последние 160 лет. В этот период на общем фоне сокращения горного оледенения число наступающих ледников возрастало при замедлении роста температур воздуха в первой и последней третях XX в. Во второй трети XX и начале XXI вв. отступление ледников усиливалось вместе с заметным ростом температуры воздуха. Такие изменения согласуются с колебаниями площади морских льдов, которая в 1960–70-х годах возросла, а в середине XX и начале XXI вв. уменьшалась.

Введение

Вопрос о мере сходства и различий в одно-временных колебаниях различных ледников по-прежнему открыт. В настоящее время большинство исследователей считают, что современное потепление на Земле началось в середине XIX в. Дендрохронологические реконструкции [1] свидетельствуют о нескольких холодных десятилетиях в середине XIX в., интенсивном потеплении в 1860–70-х годах, замедлении потепления в 1880–1920-х, его ускорении в 1930–50-х, новом замедлении в 1960–70-х и последнем

ускорении начиная с 1980-х годов. И первое, и второе из упомянутых замедлений потепления сопровождалось увеличением ледовитости полярных морей. В Северном полушарии массовые измерения ледовитости охватывают оба периода замедления потепления [2, 3], а в Южном полушарии рост ледовитости измерен лишь для 1960–70-х годов [4].

Замедление потепления в 1880–1920-х и 1960–70-х годах отмечено также прямыми метеорологическими наблюдениями на высокогорных альпийских метеостанциях [5]. Конкретные данные по этим замедлениям для Северной

Евразии приведены в исследовании [6]. Попробуем проследить, как горные ледники реагировали на замедления потепления.

Постановка проблемы. Источники данных

За последние 160 лет горное оледенение сильно сократилось. Однако существует широкий набор ледников разных размеров и морфологических типов, которые характеризуются неодинаковыми условиями аккумуляции—абляции, и колебания их фронтов год от года различны. В любой год среди множества ледников можно встретить одновременно наступающие, отступающие и стационарные. Весьма полное представление об этом явлении даёт уникальная база данных о колебаниях фронтов 73 альпийских ледников начиная с последних десятилетий XIX в. База пополняется ежегодно и доступна в Интернете [5]. Судя по данным из этой базы, охватывающим период с 1880 по 2013 г., за 130 с лишним лет в целом преобладало отступление ледников, на фоне которого возрастало число наступающих ледников в периоды отмеченных выше двух замедлений потепления климата, причём в оба эти периода наступали одни и те же ледники.

Яркий пример такого поведения — известный Верхнегриндельвальдский ледник в центральной части Швейцарских Альп. Вот какую таблицу (рис. 1) увидел В.М. Котляков, поднявшись на смотровую площадку над концом ледника: непрерывно наступая с 1960 по 1987 г., ледник увеличил свою длину на 775,6 м. Наступание было неравномерным — от 9 до 100 м/год, однако с 1988 по 2000 г. ледник непрерывно отступал. Длина его за эти годы уменьшилась на 453 м; отступление также было неравномерным: от –4 до –70 м/год. По данным [5], этот ледник наступал и в 1910–20-х годах — в период предыдущего замедления потепления.

Поскольку в упомянутую базу данных входят ледники длиной от десятых долей километра до двух десятков километров, можно предположить, что в оба периода возрастало число наступающих ледников любых характерных для этой территории размеров. Доля ледников, наступающих в каждый конкретный год в этот период преобладания отступления, лишь дважды превышала 50%, как правило, изменяясь в пределах 5–40%. Мы рассматриваем сходство перемещений ледниковых фронтов в разных регионах планеты и особенно случаи наступания отдельных ледников в общий период их глобаль-

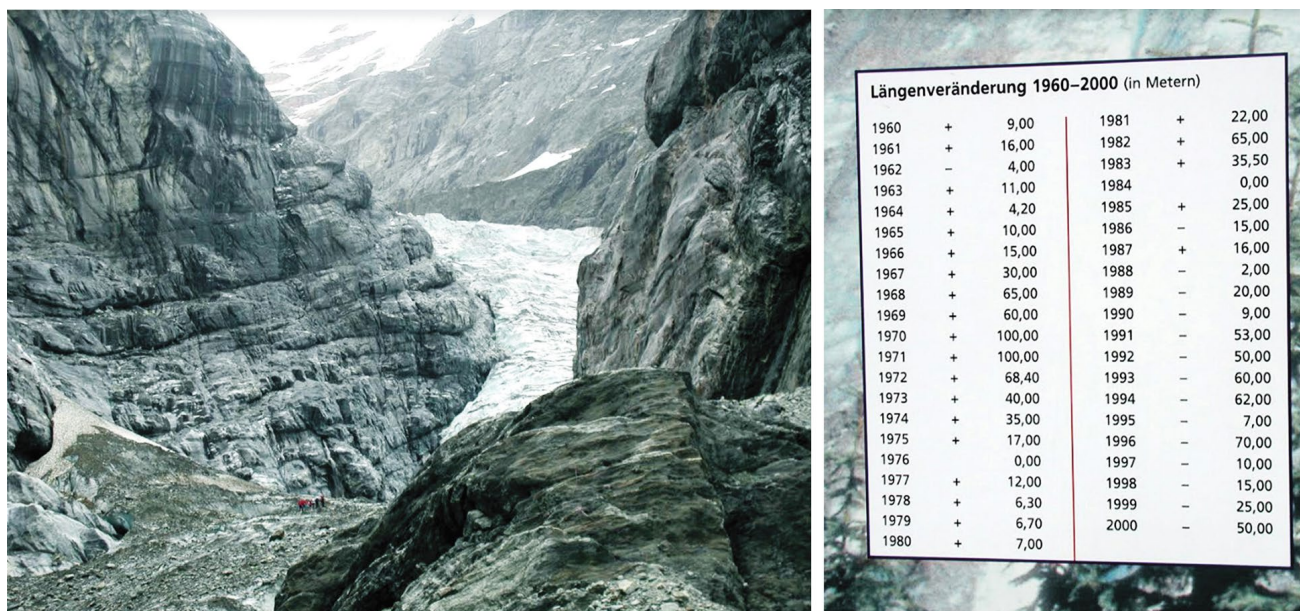


Рис. 1. Верхнегриндельвальдский ледник в Центральных Альпах в августе 2006 г. и сведения о колебаниях его фронта с 1960 по 2000 г. Фото В.М. Котлякова

Fig. 1. Oberer Grindelwald Glacier, Central Alps, on August 2006, and its front changing data during 1960–2000. Photo by V.M. Kotlyakov



Рис. 2. Горные районы, в которых есть измерения, зафиксировавшие наступания ледников.

Жёлтые значки – в первой трети XX в.; красные – в последней трети XX в. Регионы: 1 – Алтай; 2 – Кузнецкий Алатау; 3 – Камчатка; 4 – Западная Монголия; 5 – Китай (Ньянчентангла); 6 – Гималаи (ледник Кхумбу); 7 – Кавказ; 8 – Полярный Урал; 9 – Скандинавия; 10 – Альпы; 11 – Исландия; 12 – хр. Брукса; 13 – Береговой хребет; 14 – гора Олимпус; 15 – Скалистые горы; 16 – Мексика; 17 – Патагония; 18 – Новая Зеландия

Fig. 2. Mountain regions where advancing glaciers were fixed.

Yellow marks indicate the first third of the 20th century; red marks – the last third of the same century. Regions are: 1 – Altai; 2 – Kuznetsky Alatau; 3 – Kamchatka; 4 – Western Mongolia; 5 – China (Nyanchentangla); 6 – Himalayas (Khumbu); 7 – Caucasus; 8 – Polar Urals; 9 – Scandinavia; 10 – Alps; 11 – Iceland; 12 – Brooks Range; 13 – Coast Range; 14 – Mount Olympus; 15 – Rocky Mountains; 16 – Mexico; 17 – Patagonia; 18 – New Zealand

ного сокращения. Основные использованные источники – база данных WGMS (World Glacier Monitoring Service) [6], доступная в Интернете, две обобщающие монографии [7, 8] и ряд других публикаций. Использованы также последние сведения о перемещении фронта ледника Козельского на Камчатке в начале XXI в., полученные А.Я. Муравьевым. На рис. 2 показаны районы в Северном и Южном полушариях, где инструментально зафиксированы случаи наступания ледников во время периодов замедления потепления. Для второго периода (1960–70-е годы) есть данные измерений для всех 18 районов, для первого (1880–1920-е годы) – лишь для восьми районов в Евразии, Северной и Южной Америке и Новой Зеландии. Во всех 18 районах, как показывают измерения, в периоды ускоре-

ния потепления скорость перемещения фронта отступавших ледников возрастала.

Перемещения ледниковых фронтов по данным измерений

За 160 лет в целом и до 1920-х годов. Положение фронта ледников 160 лет назад фиксируют хорошо выраженные конечные морены. Рельеф ледниковых долин ниже и выше этих морен неодинаков, и положение фронтов ледников середины XIX в. прекрасно видно на аэрофотоснимках. По данным О.Н. Соломиной [9], в горах с обширным оледенением отступление фронтов составляет в среднем 500–800 м. Площадь ледников Алтая с 1850 по 2003 г. сократилась на

21% [10], а ледников Кавказа – на 47% [11]. В среднем скорость сокращения площади ледников за 100–160 лет составила десятые доли процента в год [12]. Данные измерений наступающих ледников во время замедления потепления в 1880–1920-х годов имеются для Альп, Кавказа, Алтая, Берегового хребта, Скалистых гор, Патагонии, Новой Зеландии (см. рис. 2).

Альпийские ледники, наступавшие в первый период замедления потепления, подробно отражены в исследовании [5] и на рис. 3.

На Кавказе Н.А. Буш [13] обнаружил ряд ледников, наступавших с 1907 по 1911 г.: ледник Узункол продвигался вперёд в 1907–1909 гг., ледники Терскол и Шхельда – в 1911 г. Как пишет И.С. Бушуева [14], в начале XX в. у многих кавказских ледников отмечаются два наступания: две моренные гряды, сформированные в этот период, присутствуют на предпольях ледников Кашкаташ, Терскол и Цея, одна моренная гряда – у ледника Безенги. Морены 1910–20-х годов сформировались и у ледников Большой Азау и Джанкуат [15]. Годы наступаний семи кавказских ледников, исследованных И.С. Бушуевой, отражены в нижней части рис. 3.

На Алтае М.А. Душкин [16] выделил небольшие наступания ледников в 1911–1914 и 1927–1930 гг. Инструментально зафиксирована подвижка ледника Малый Актру в 1911 г. [17].

На Береговом хребте в Британской Колумбии (Канада) 14 ледников наступали в 1915–1928 гг. [18]. По данным [19], большинство ледников в *Скалистых горах* Канады имеют по две–три морены, сформировавшиеся с 1880-х по 1930-е годы. Ледник Пио XI на *Южном Патагонском ледниковом поле* продвигался вперёд в 1925–1928 гг. По данным [20], в *Северной Патагонии* у большинства ледников морены отложились в 1910-е и 1920-е годы. В *Новой Зеландии*, согласно измерениям, ледник Франца-Иосифа наступал в 1908–1909 гг., ледник Стокинг – в 1904–1913 гг. Кроме того, в 1900–1930 гг. увеличивалось число ледниковых пульсаций по всему миру [6].

Во время интенсивного потепления 1930–50-х годов и его замедления в 1960–70-х годах. Для этого периода измерений гораздо больше. Данные базы WGMS показывают резкое сокращение числа наступающих ледников и ледниковых пульсаций в обоих полушариях в 1930–50-х и их увеличение в 1960–70-х годах.

В Береговом хребте в Британской Колумбии (Канада) и в Альпах в 1940–50-х годах темпы деградации значительно возрастали по сравнению с 1900–30-ми годами. С конца 1950-х по 1970-е годы отступление ледников замедлилось по сравнению с 1940–50-ми годами, хотя некоторые ледники в этот период испытали подвижки.

На Кавказе в 1970–80-х годах шесть из семи исследованных И.С. Бушуевой ледников продвигались вперёд [14]. Морены этого времени хорошо идентифицируются на аэрофотоснимках 1987 г. Наступание ледника Мижирги отмечено И.С. Бушуевой при сравнении снимков 1987 и 2004 гг. По измерениям В.Д. Панова [11], число наступающих на Северном Кавказе ледников увеличивалось с 10% в 1960 г. до 20% в 1979–1985 гг. В монографии Панова приводится список из 18 ледников, площадь которых выросла с 1965 по 1990 г.

На Алтае инструментально зафиксированы подвижки ледника Правый Актру в 1960–1969 гг., ледника Водопадный в 1978 г. и ледника Малый Актру в 1960–1969 и 1979 гг. [17]. В результате прямых наблюдений томских гляциологов во второй половине XX в. на 120 алтайских ледниках выделены 1979–1980, 1987–1988 и 1993 гг. как периоды увеличения числа наступающих ледников. В 1993 г. продвигались вперёд все ледники бассейна Актру, а также многие ледники Катунско-Чуйского центра оледенения [21, 22].

В Исландии [8] с 1930 по 2010 г. зафиксированы ежегодные изменения положения фронта ледников Солхеймайокуль на юге и Хермингсйокуль на западе страны на фоне колебания летних температур воздуха на метеостанции Стиккисхолмур. Изменения фронта происходили в полном согласии с изменениями летних температур воздуха. Оба ледника наступали с 1960-х по 1980-е годы. В работе А. Раддела [23] упоминаются 36 исландских ледников, наступавших в этот период. В Скандинавии период увеличения числа наступающих ледников сдвинут на начало 1990-х годов.

В Азии, в Западной Монголии, отмечено наступание нескольких ледников в 1987, 1988 и 1993 гг. [24]. В Китае, в горах Ньянчтангла (см. рис. 2) [8], сопоставлены размеры 88 ледников общей площадью 444,6 км² за 1980 и 2001 гг. Их площадь за это время уменьшилась всего на 2 км², а 40% ледников увеличились в размерах.

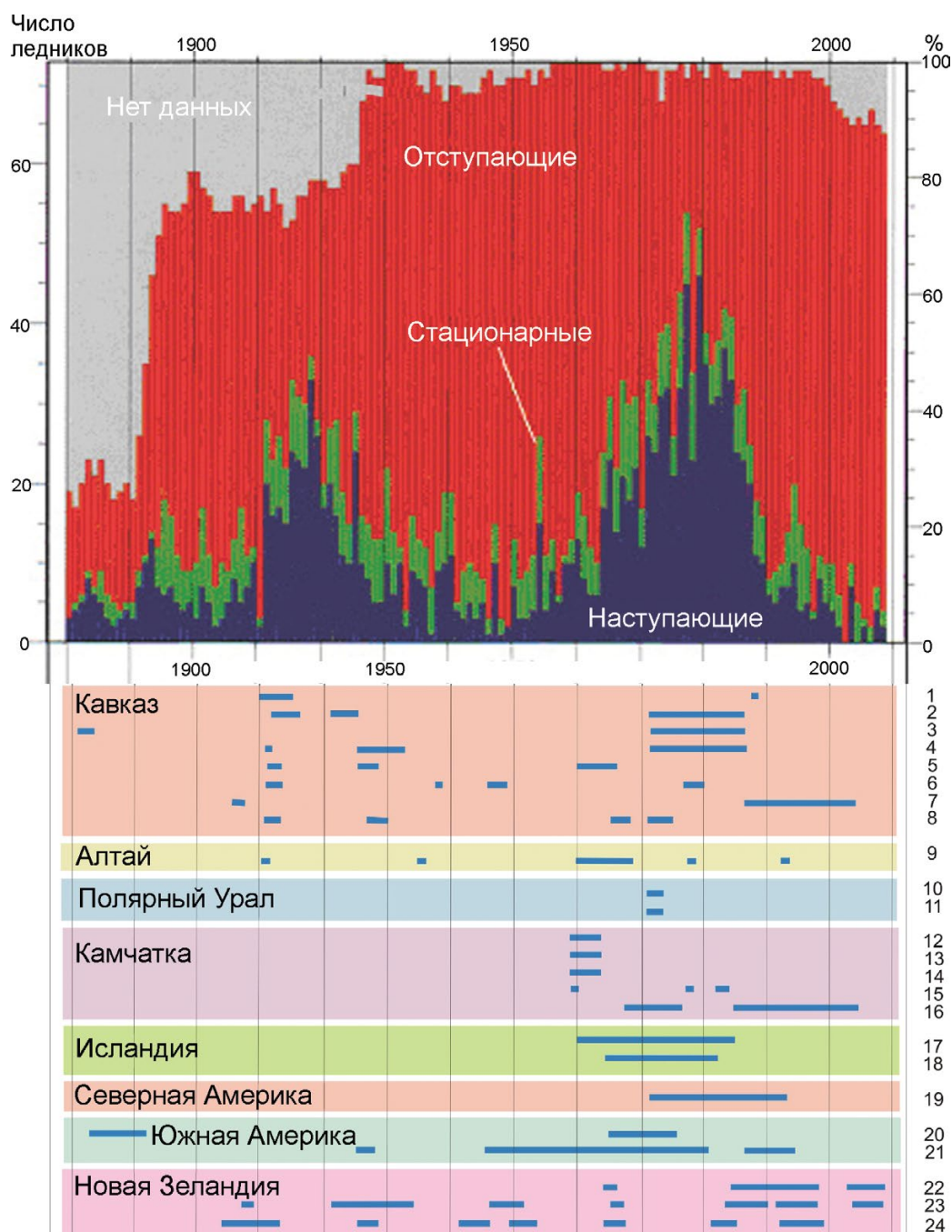


Рис. 3. Число отступающих (красный цвет), стационарных (зелёный цвет) и наступающих (голубой цвет) ледников Альп [5] и годы наступания ледников в других областях земного шара [7].

Номера ледников: на Кавказе – 1 – Джанкуат, 2 – Кашкаташ, 3 – Уллукам, 4 – Терскол, 5 – Алибек, 6 – Безенги, 7 – Мижирги, 8 – Цея; на Алтае – 9 – Малый Актру; на Полярном Урале – 10 – ИГАН, 11 – Обручева; на Камчатке – 12 – Эрмана, 13 – Сопочный, 14 – Влодавца, 15 – Бильченок, 16 – Козельский; в Исландии – 17 – Солхеймайокуль, 18 – Хермингсйокуль; в Северной Америке – 19 – Блу Глейшер; в Южной Америке – 20 – Росс, 21 – Пио XI; в Новой Зеландии – 22 – Фокс, 23 – Франц-Иосиф, 24 – Стокинг

Fig. 3. Yearly classification of retreating (red color), stationary (green color), and advancing (blue color) glaciers in the Alps [5], and the years of some advancing glaciers in other regions of the globe [7].

Glaciers numbers: *Caucasus* – 1 – Djankuat, 2 – Kashkatash, 3 – Ullukam, 4 – Terskol, 5 – Alibek, 6 – Bezengi, 7 – Mizhirgi, 8 – Tsey; *Altay* – 9 – Maly Aktru; *Polar Urals* – 10 – IGAN, 11 – Obrucheva; *Kamchatka* – 12 – Ermana, 13 – Sopochny, 14 – Vlodavtsa, 15 – Bil'chenok, 16 – Kozel'sky; *Iceland* – 17 – Solkheimayokull, 18 – Khermingsyokull; *North America* – 19 – Blue Glacier; *South America* – 20 – Ross, 21 – Pio XI; *New Zealand* – 22 – Fox, 23 – Franz-Jozef, 24 – Stoking

Таблица 1. Интенсивность сокращения площади ледников Колумбии в конце XX и начале XXI вв. [по 26]

Ледниковая система	Исходная площадь, км ²	Сокращение площади в разные периоды конца XX в.			Сокращение площади с конца XX до начала XXI в.		
		годы	км ²	% в год	годы	км ²	% в год
Сьерра Невада де Санта Марта	12,0	1989–1995	0,9	1,2	1995–2002	3,2	4,1
Сьерра Невада дель Чочу	31,4	1986–1994	7,7	3,1	1994–2003	3,9	1,8
Вулкан Невадо дель Руиз	14,1	1990–1997	2,3	2,3	1997–2002	1,5	2,5
Вулкан Невадо Санта Исабель	6,4	1987–1995	1,1	2,1	1995–2002	2,0	5,3
Вулкан Невадо дель Толима	1,6	1987–1997	0,4	2,5	1997–2002	0,2	3,3
Вулкан Невадо дель Хьюила	13,9	1990–1996	0,6	0,4	1996–2001	0,4	0,6

В Гималаях, в горах Кхумбу [8], многие ледники в 1960–1990 гг. находились в стационарном состоянии или наступали слабо.

В горах *Северной Америки* лучше всего исследована динамика ледника Блу Глейшер – его площадь измерялась с 1920 по 2003 г. не реже одного раза в пятилетие [8]. С 1920 по 1963 г. ледник отступал, в 1963–1970 гг. был стационарен, а в 1971 г. началось его наступание, продолжавшееся до 1993 г., затем он стал устойчиво отступать. В хр. Брукса в 1970–1971 гг. наступал ледник Маккол, в 1972–1978 гг. – ледник Лаел Ист, в 1960–1975 гг. – ледник Шестринг. В Мексике с 1968 по 1979 г. наступал ледник Венторилло [7], расположенный на вулкане Попокатепетль (19,08° с.ш., 98,63° з.д.).

В *Южном полушарии* отмечено наступание ледников на Южном Патагонском ледниковом поле. С 1945 по 1986 г. из 48 ледников два увеличили свои размеры: самый большой ледник Пио XI (1219 км²) и ледник Морено (258 км²). По данным [20], в Северной Патагонии в середине 1970-х годов у большинства ледников отложились морены. В Аргентине из 174 изученных ледников 24 наступали в последней трети XX в. [7]. В *Новой Зеландии* [7] хорошо изучена динамика трёх ледников: ледник Фокс наступал в 1964–1966 и 1984–1998 гг., ледник Стокинг – в 1904–1913, 1964–1967 и 1981–1992 гг., ледник Франц-Иосиф – в 1908–1909 и 1983–1998 гг.

При ускорении потепления в конце XX – начале XXI вв. Анализ базы данных WGMS (World Glacier Monitoring Service) и нескольких детальных исследований [7, 8, 25–28] показал резкий рост интенсивности сокращения ледников в самом конце XX (табл. 1) и первой декаде XXI вв. (табл. 2), когда площадь ряда ледников уменьшалась не на десятки, а на целые проценты в год.

Субантарктика. По данным [8], на субантарктических островах ледники в середине XX в. занимали 7863 км². Для некоторых ледников имеются данные об их площади в середине и конце XX в., а также в конце первого десятилетия XXI в. Данные о ледниках о. Хёрд в южной части Индийского океана опубликовал А. Радделл [23]. Он использовал космические снимки SPOT 1988 г. и аэрофотоснимки 1947 г. В 1988 г. на острове насчитывалось 29 ледниковых бассейнов, содержащих 41 ледник общей площадью 254 км², тогда как в 1947 г. это оледенение занимало площадь 285 км². По данным космического снимка Worldview-1 от 23 марта 2008 г. [29], площадь этих ледников составляла только 231 км². Таким образом, ледники на этом острове с 1947 по 1988 г. теряли в среднем 0,26% площади в год. После 1988 г. сокращение площади ускорилось вдвое и составило 0,51% в год.

Е. Бертье с соавторами [8] опубликовал результаты измерений площади ледниковой шапки Кука на одном из островов Кергелен в Индийском океане. Авторы располагали снимками Landsat за 1963 и 2001 гг. и снимком ASTER, сделанном в апреле 2009 г. Площадь ледниковой шапки уменьшалась с 500,9 км² в 1963 г. и 410 км² в 2001 г. до 380 км² в 2009 г. В 1963–2001 гг. она сокращалась ежегодно в среднем на 0,48%, а в 2001–2009 гг. – на 0,78%. Мы видим, что интенсивность сокращения в 2001–2009 гг. превышает интенсивность сокращения в 1963–2009 гг. более чем в полтора раза.

Приэкваториальная зона. Ледники между Северным и Южным тропиками в середине XX в. занимали площадь около 1600 км² [8]: 14 км² приходилось на вулканы Новой Гвинеи, 22 км² – на вулканы Африки, 34 км² – на вулканы Мексики и около 1500 км² – на высокогорье Южных

Таблица 2. Интенсивность сокращения площади ледников во второй половине XX – начале XXI вв.

Ледниковая система	Исходная площадь, км ²	Сокращение площади с середины XX до начала XXI вв.			Сокращение площади в начале XXI в.		
		годы	км ²	% в год	годы	км ²	% в год
Эльбрус [25]	132,51	1957–2007	11,51	0,18	1997–2007	4,85	0,39
Алтай, Монгун-Тайга [6, 30, 31]	29,3	1965–2008	9,0	0,71	1994–2008	4,8	1,35
Алтай, Табын-Богдо-Ола [6, 30]	28,95	1962–2009	6,2	0,45	2002–2009	3,0	1,66
Стубайские Альпы [8, с. 446]	54,1	1969–2003	17,2	0,94	1997–2003	10,3	3,64
Сьерра Невада де Санта Марта, Колумбия [8, с. 626]	21,4	1939–2010	14,0	0,92	2002–2010	0,98	1,46
Сьерра Невада дель Чочу, Колумбия [8, с. 626]	38,9	1955–2010	2,9	1,07	2003–2010	3,8	2,74
Вулкан Невадо дель Руиз, Колумбия [8, с. 627]	21,0	1959–2010	11,3	1,16	1997–2010	2,06	1,35
Вулкан Невадо Санта Исабель, Колумбия [8, с. 627]	10,8	1946–2010	9,0	1,30	1996–2010	3,5	4,72
Вулкан Невадо дель Толима, Колумбия [8, с. 628]	3,10	1946–2010	2,36	1,19	2002–2010	0,30	3,58
Вулкан Невадо дель Хьюила, Колумбия [8, с. 628]	17,5	1959–2010	7,8	0,62	2001–2010	3,25	2,79
О. Херд, Индийский океан, Субантарктика [8, с. 759]	288,0	1947–2008	57,0	0,32	1988–2008	26,0	0,51
Ледяная шапка Кука, о-ва Кергелен [8, с. 766]	500,9	1963–2009	120,9	0,52	2001–2009	30,0	0,78

Анд в Колумбии, Венесуэле, Эквадоре, Перу и Боливии. Все эти ледники во второй половине XX в. сократили свою площадь. Крупнейшая ледниковая шапка в Перу – Келькайя – потеряла за 1985–2010 гг. 30% площади, или 0,9% в год. При этом с 1992 по 1998 г. скорость сокращения составляла 1,4% в год. Оледенение шести вулканов Колумбии общей площадью около 110 км² (в 1950-х годах) покрыто несколькими космическими съёмками. Все они (см. табл. 2) показывают заметный рост интенсивности сокращения площади ледников в начале XXI в.

В табл. 1 приведены результаты многократных измерений площади ледников шести вулканов Колумбии [26]. Эти ледники изучаются сотрудниками трёх колумбийских научно-исследовательских институтов в кооперации с группой гляциологов Университета Цюриха, возглавляемой У. Хеберли, представляющей WGMS. С середины 1980-х годов по настоящее время проводятся ежегодные полевые измерения положения концов ледников, проведены двукратные стереофотограмметрические съёмки, широко используются космические снимки ASTER, Landsat TM и ETM+, SPOT и с 2008 г. ALOS [26]. Все ледники, кроме ледников вулкана Чочу, увеличили скорость отступления в начале XXI в. по сравнению с концом XX в. На пяти вулканах скорость сокращения площади оледенения в обоих случаях составляла целые проценты в год. Лишь на вулкане Хьюила она изменилась от 0,4 до 0,6% в год. Наиболее ин-

тенсивно (2,8% в год) ледники сокращались в 2001–2010 гг. И даже оледенение вулкана Руиз не выпало из общего правила, хотя в 1985 г. произошло его достаточно мощное извержение.

Северное полушарие выше 23,45° с.ш. Скорость сокращения площади оледенения Стубайских Альп [8] увеличилась с 0,94% в год в 1969–2003 гг. до 3,64% в год в 1997–2003 гг. Для Кавказа [12], по примерным оценкам, основанным на данных каталога К.И. Подозерского и Каталога ледников СССР, скорость сокращения площади основной части ледников за 1911–1979 гг. составила 0,45% в год. По данным космической съёмки, сокращение площади ледников Центрального Кавказа за 2001–2010 гг. было равно 0,52% в год. Скорость сокращения ледников Эльбруса [25] в 1957–1997 гг. – 0,14% в год, в 1979–1997 гг. – 0,12% в год, в 1997–2007 гг. – 0,39% в год.

На Алтае скорость сокращения площади ледников массива Монгун-Тайга увеличилась с 0,49% в год в 1965–1994 гг. до 1,35% в год в 1994–2008 гг., а ледников северного склона Табын-Богдо-Ола – с 0,28% в год в 1962–2002 гг. до 1,66% в год в 2002–2009 гг. [7, 30, 31]. По данным табл. 2 можно проследить, что в 1994–2009 гг. ледники отступали в 2–3 раза быстрее по сравнению с более длительным периодом 1957–2009 гг.

На Полярном Урале [7, 32] площадь ледников ИГАН и Обручева неоднократно измерялась геодезическими методами. Размеры этих двух ледников увеличивались с 1968 по 1971 г.

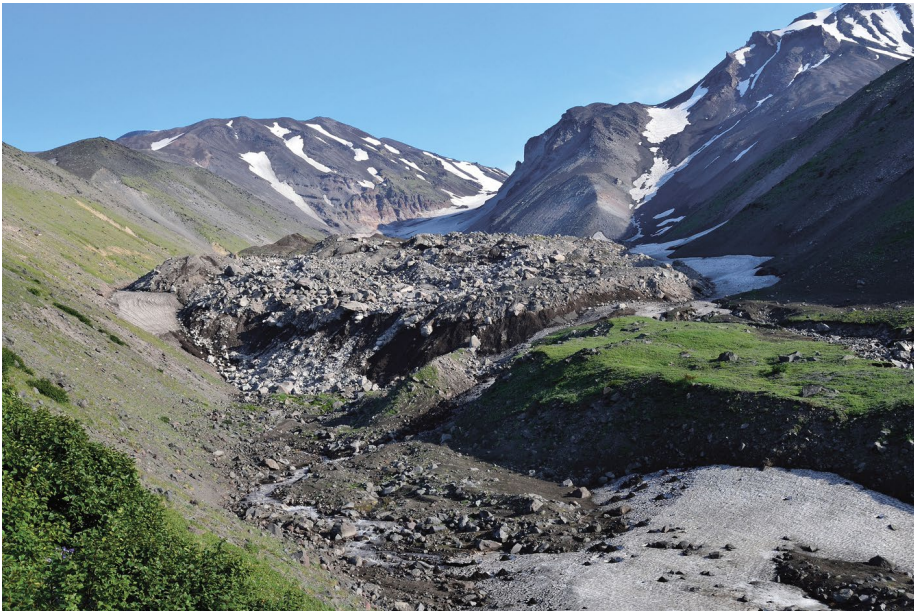


Рис. 4. Ледник Козельский 20 августа 2015 г. Фото А.Я. Муравьева

Fig. 4. The Kozelsky Glacier on August 20, 2015. Photo by A.Ya. Muraviev

и уменьшались с 1971 по 1973 г. с интенсивностью более 1% площади в год [33]. В целом же, по данным М.Н. Иванова [34], ледник Обручева с 1953 по 1973 г. сокращал свою площадь в среднем на 0,4% в год, а интенсивность сокращения с 1973 по 2000 г. составляла 0,8% в год. Площадь ледника ИГАН в 1973 г. была такой же, как и в 1953, и сокращалась с интенсивностью 0,6% в год в 1973–2000 гг.

На Камчатке, по наблюдениям А.Я. и Я.Д. Муравьевых [35], ситуация имеет свои особенности: ледники на действующих вулканах в отличие от невулканических не потеряли площадь за последние 60 лет, а в нулевые годы XXI в. наступали. Приведём ранее не публиковавшиеся данные А.Я. Муравьева об изменениях скорости этого наступания на леднике Козельский.

Ледник Козельский (рис. 4), расположенный в пределах Авачинской группы вулканов, во время извержения Авачинского вулкана в феврале 1945 г. был полностью перекрыт чехлом пирокластического материала мощностью до 2 м, но не уничтожен [36]. В последующие годы в области питания поверх вулканогенного покрова начало формироваться фирновое поле. К 1967 г. его размеры достигли 0,7 км², а в 1968–1976 гг. область питания ледника была полностью восстановлена. К центру фирновой области слой пирокластического материала уходит на глубину порядка 40–50 м и вновь появляется на дневной поверхности в области абляции [36]. В верх-

ней части ледника, кроме отложений 1945 г., в состав вулканогенной толщи входят и продукты предыдущих извержений Авачинского вулкана. Таким образом, вулканогенный материал, включённый в толщу ледника, увеличивает его массу, что способствует продвижению фронта ледника.

Многоснежные зимы 1971–1976 гг. в сочетании с относительно низкими температурами в периоды абляции привели к активизации ледника в эти годы. По данным [36], за 1971–1974 гг. фронт ледника продвинулся на 100–110 м, а за следующие два года – ещё на 220–230 м. В результате подвижки 1971–1976 гг. площадь ледника Козельский увеличилась на 0,09 км², а длина – на 330 м. Фронт ледника опустился с 960 до 890 м. На 1978–1981 гг. приходится стабилизация и кратковременное отступление конца ледника. Для анализа динамики языка ледника Козельский с 1978 г. выполнено дешифрирование его границ на космических снимках 2007, 2009, 2012 и 2015 гг. Использовался ортопродукт на базе снимка ASTER от 16 июля 2007 г. (точность в плане 15 м), снимки GeoEye от 16 июня 2009 г. и снимок WorldView-2 от 18 сентября 2012 г. (субметровое разрешение). Дополнительно использованы координаты линии фронта в августе 2015 г., зафиксированные с помощью GPS-навигатора, и ортотрансформированные аэрофотоснимки 1967 и 1978 гг. (точность в пределах 10 м). Результаты выполненных измерений представле-

Таблица 3. Изменения положения фронта и площади языка ледника Козельский в 1967–2015 гг.

Годы	Наступание фронта ледника (± 3), м	Приращение площади языка ледника, км ²	Приращение площади, км ² /год
1967–1978	335	0,132	0,012
1978–2007	540	0,154	0,005
2007–2009	55	0,035	0,018
2009–2012	45	0,022	0,007
2012–2015	35	0,005	0,002
1967–2015	1010	0,348	0,007

ны в табл. 3 и на рис. 5. Расстояния, на которые фронт ледника продвигался в разные периоды, измеряли вдоль осевой линии ледника.

После отступления в 1978–1981 гг. фронт ледника, содержащий в своём составе достаточно тяжёлый слой пирокластического материала, продвигался вперёд вплоть до 2015 г. Известно также, что скорость продвижения возросла после схода на ледник гигантской снежной лавины в конце января 1996 г. Проанализировав данные табл. 3, заметим, что приращение площади ледника было наиболее интенсивным (0,012 км²/год) в холодный и снежный цикл 1967–1978 гг., а наименее интенсивным (0,005 км²/год) – в 1978–2007 гг. В 2007–2015 гг. приращение площади составило 0,08 км²/год, т.е. снова начало возрастать. Несмотря на сложную картину динамики, связанную с воздействием вулканогенного фактора, периоды ускорения и замедления наступания ледника Козельский совпадают с периодами ускорения и замедления роста температур воздуха.

Ледник Кропоткина, расположенный в цирке вулкана Большой Семячик, достигал минимальных размеров в конце 1940-х и 1990-х годов [37]. Во второй половине 1960-х и начале 1970-х годов ледник Кропоткина наступал. Ледник Эрмана, расположенный в Ключевской группе вулканов, начал наступать после схода оползня объёмом 0,3 км³ по Крестовскому жёлобу Ключевского вулкана в 1945 г. В дальнейшем меньшие по объёму обвалы неоднократно наблюдались во время извержений вулканов в 1980-х и 2000-х годах. Всё это время ледник непрерывно наступал. По состоянию на август 2015 г., ледник Эрмана продолжает наступать [6].

В последние десять лет. Начиная со второй половины нулевых годов XXI в. появились при-

знаки замедления потепления. Работы [3, 4] указывают на начало увеличения ледовитости: в Антарктике в 2007 г., а в Арктике в 2013 г., что совпадает с началом некоторого замедления отступления горных ледников после 2007 г. Примером такого замедления служат результаты измерений параметров ледника Сары-Тор на Тянь-Шане в 2013 г. и сравнение их изменений за 1987–2003 и 2003–2012 гг.: в первом случае площадь ледника ежегодно сокращалась на 0,80%, во втором – на 0,67% [38].

По свидетельству К.В. Чистякова с соавторами [30], с 2009 по 2013 г. резкое увеличение заснеженности и похолодание в летние сезоны привели сначала к улучшению состояния малых ледников, а после 2011 г. – к снижению скоростей их отступления на северном склоне массива Табын-Богдо-Ола на Алтае. По данным [31], площадь ледников массива Монгун-Тайга, уменьшавшаяся в 1990–2007 гг., в 2008–2011 гг. оставалась неизменной.

Интересно, что непрерывно наступавший в последние 50 лет ледник Козельский в Авачинской группе вулканов ускорил свое наступание после 2007 г.: с 0,005 км²/год в среднем за период 1978–2007 гг. до 0,012 км²/год в среднем за 2007–2015 гг. В Альпах [5] по наблюдениям на 73 ледниках перемещение их фронтов происходило следующим образом: в 1989 г. наступали 12 ледников, в 2003 г. – ни одного, в 2012 г. – один, а в 2013 г. их снова насчитывалось 12. Упомянутый Верхнегриндельвальдский ледник (см. рис. 1), отступавший с 1988 г., в 2015 г. снова начал продвигаться вперёд.

Таким образом, анализ имеющихся данных показывает, что во всех перечисленных районах, как в Южном, так и в Северном полушариях, достаточно большое число ледников изменяло свою динамику, реагируя на ускорение и замедление потепления в течение всего лишь нескольких лет.

Обсуждение

Длинные ряды ежегодных массовых наблюдений за перемещениями фронта ледников в нынешний период общего потепления существуют лишь в Швейцарских Альпах. Эти данные показывают одновременное присутствие стационарных, наступающих и отступающих



Рис. 5. Положения фронта ледника Козельский в 1967–2015 гг. (в подложке снимок GeoEye 2009 г.):

2015 г. – маршрутные наблюдения; 2012 г. – снимок WorldView-2; 2009 г. – снимок GeoEye; 2007 г. – снимок ASTER; 1978 г. – АФС; 1967 г. – АФС; пунктирная линия – осевая линия ледника, вдоль которой проводились измерения

Fig. 5. Frontal lines of the Kozelsky Glacier in 1967–2015 (on the background of the space imagery GeoEye 2009):

2015 – field observations; 2012 – space imagery WorldView-2; 2009 – space imagery GeoEye; 2007 – space imagery ASTER; 1978 – aerial photo; 1967 – aerial photo; the dotted line – the axial line of the glacier, along which the measurements were performed

ледников. Однако в целом преобладают отступающие ледники. Максимальное число наступающих ледников приходится на периоды замедления потепления, хотя многие ледники и в эти периоды продолжают отступать. Таким образом, в одном и том же горном районе сосед-

ствуют ледники, по-разному реагирующие на короткие периоды колебаний температуры воздуха. Фронты одних ледников следуют сверхвековому тренду температуры воздуха, а другие откликаются наступанием на внутривековые замедления потепления.

Современная гляциология [39] различает четыре вида колебаний ледников: 1) вынужденные колебания, обусловленные изменениями внешней нагрузки, т.е. скорости аккумуляции—абляции льда; 2) высокочастотные колебания скорости скольжения, вызываемые изменениями шероховатости ложа ледника под влиянием интенсивного таяния льда и подледникового стока; 3) низкочастотные колебания, связанные с проникновением температурных колебаний в толщу ледника; 4) релаксационные автоколебания, возникающие из-за нестационарности нелинейных кинематических связей в леднике и выражающиеся в резких подвижках ледников.

Механизм вынужденных колебаний изучается путём наблюдений за процессами внешнего (между ледником и атмосферой) и внутреннего массо-энергообмена ледников. Остановимся подробнее на двух примерах таких наблюдений в период замедления потепления в 1960–80-х годах.

Причины наступания ледника *Малый Актру* на Алтае в конце 1970-х годов выявлены путём измерений составляющих баланса массы и поверхностных скоростей движения ледника с помощью ежегодных фототеодолитных съёмок [17, 40, 41]. Баланс массы начиная с 1965 г. изучался с помощью непосредственных наблюдений. При среднем значении -10 г/см^2 его величины достигали $+40 \text{ г/см}^2$ в 1975, $+68 \text{ г/см}^2$ в 1976 и $+49 \text{ г/см}^2$ в 1977 г. В 1978 г. поверхность льда в верхней части языка повысилась на 7,5 м, а в 1979 г. началось ускорение её движения. В июне 1980 г. поверхность всего языка оказалась на 1–8 м выше, чем в июне 1977 г., а поверхность фирновой области опустилась. По-видимому, по леднику за два года прошла кинематическая волна. Прирост массы ледника в 1975–1977 гг. привёл к его наступанию в 1979 г., затем в первой половине 1980 г. фронт языка был стабилен и к середине сентября у его нижнего края обнажилась вновь образованная подковообразная напорная морена высотой 0,5–0,8 м. После двух лет отрицательного баланса (-31 г/см^2 в 1981 г. и -66 г/см^2 в 1982 г.) последовало восемь лет положительного баланса со средним значением $+22 \text{ г/см}^2$, затем баланс менялся: -54 г/см^2 в 1991 г., -17 г/см^2 в 1992 г. и $+34 \text{ г/см}^2$ в 1993 г. Именно в 1993 г. отмечено наступание не только ледника Малый Актру, но и всех остальных ледников в этом горно-ледниковом бассейне [40].

На Полярном Урале с 1953 по 1973 г. под руководством П.А. Шумского и Д.Г. Цветкова проводились геодезические измерения размеров и формы карового ледника *Обручева* площадью $0,3 \text{ км}^2$ и длиной около 1 км [42, 43]. Была отсле-

жена динамика физической поверхности ледника и его изохронных поверхностей, т.е. поверхностей ледника в разные моменты времени, которые благодаря аккумуляции снега оказывались со временем погребёнными внутрь ледника, а затем пересекались под тем или иным углом с ещё более поздними поверхностями абляции. Выяснилось, что размеры и форма ледника испытывают серию колебаний со сложным частотным спектром.

В 1963–1964 гг. вся поверхность ледника опустилась — в середине на 1,2 м, а в верховьях и внизу на 2 м; в 1964–1965 гг. нижняя часть ледника опустилась, а верхняя поднялась. Короткопериодические колебания с 1963 по 1965 г. способствовали тенденции к уменьшению ледника, которая с 1966 г. сменилась тенденцией к росту, продолжавшемуся до 1968 г., после этого началось новое уменьшение вплоть до 1971 г. За 1953–1966 гг. длина ледника сократилась на 120 м (примерно на 10%), площадь — на 15%, объём — на 27%. Поверхность ледника понизилась в среднем на 11 м. В центре ледника снижение поверхности составило около 6 м, а у конца ледника — 24 м. За 1966–1969 гг. длина ледника уменьшилась ещё на 7 м, но объём его вырос на 9%, поверхность повысилась в среднем на 3 м, а в верхней части ледника — местами до 11 м. В 1971–1973 гг. площадь ледника увеличивалась со скоростью 2,4% в год. Измерения дали возможность построить поля скорости аккумуляции, деформации, толщины, реальной скорости перемещения поверхности и скорости вертикального и горизонтального перемещения поверхности для пяти приблизительно годовых и одного двухлетнего промежутка времени. На основании этих данных П.А. Шумский сделал заключение: «Вполне понятным и закономерным представляется вывод, который ранее четко не формулировался и на первый взгляд может показаться неожиданным — о мгновенности реакции поля скорости льда на внешнюю нагрузку, обусловленной в свою очередь немедленной реакцией на нее полей напряжения и скорости деформации» [43, с. 68].

Заметим, что реальная поверхность языка ледника Обручева два эти года оставалась плоской. Чтобы выявить вертикальную составляющую движения поверхности языка, составившую в его центре 5 м [44], понадобилось ввести понятие «изохронной поверхности», т.е. геодезически измерить и представить в виде изолинейной карты положение, которое заняла бы прошлогодняя поверхность языка, если бы летняя абляция не «срезала» выпуклость, образовавшуюся в его центре в результате вспучивания языка в год, когда ледник наступал. Для этого понадобилось

на карту реальной поверхности наложить карту распределения слоя абляции этого года, составленную по результатам речных измерений.

Таким образом, очевидно, что изменения формы языков ледников в результате их многочисленных небольших наступаний длительностью 2–3 года легко уничтожаются поверхностной абляцией, причём заметить визуально такое наступание часто невозможно. Кроме того, многочисленные данные [5, 32, 43] показывают, что ежегодный баланс массы неодинаков даже на близко расположенных ледниках. Решить проблему прогноза перемещения фронта каждого конкретного ледника невозможно без выяснения вопроса, к какому из двух выявленных выше типов относится ледник: следует ли его фронт за сверхвековым или внутривековым трендом изменения температур воздуха.

По нашему мнению, первым шагом к решению проблемы может стать комплексное сопоставление по каждому из ледников данных за ряд лет о его ежегодном балансе, перемещении фронта и цифровой модели его ложа. Такое сопоставление в настоящее время возможно лишь для небольшого числа ледников, но оно может быть расширено с получением первых конкретных результатов.

Выводы

В течение современного потепления климата, продолжающегося уже 160 лет, оледенение в целом сократилось и в Северном, и в Южном полушариях. Средняя скорость сокращения составила десятые доли исходной площади в год. Одна часть ледников отступала непрерывно; в периоды замедления потепления в 1880–1920-е годы скорость отступления этих ледников умень-

шалась. Другая часть ледников в течение этих двух периодов переходила к наступанию. Величина таких продвижений ледников измерена в 18 районах Северного и Южного полушарий. Она составляет от десятых до целых процентов исходной площади в год. Продолжительность таких наступаний у каждого отмеченного ледника была индивидуальной, но наступающие ледники известны во всех географических зонах.

Усиление потепления в самом конце XX и начале XXI вв. сопровождалось повсеместным ускорением отступления горных ледников. Данные последних лет подтверждают мнение о быстрой, менее десятка лет, реакции фронта ледников на изменение температуры воздуха. Обнаружено два типа такой реакции: одни ледники реагируют в основном на сверхвековые колебания температуры воздуха, а другие – и на сверхвековые, и на внутривековые изменения температуры. Определение реакции конкретного ледника на изменение климатических условий требует комплексного сопоставления массовых данных о ежегодном балансе массы, перемещении фронта и особенностях рельефа ложа ледника.

Благодарности. При подготовке публикации использованы результаты, полученные в рамках исследований по теме № 0148-2014-0007 Плана научно-исследовательских работ Института географии РАН и по гранту РГО № 05/2017/РГО-РФФИ

Acknowledgements. This paper includes the results of research project № 0148-2014-0007 of the Research Plan of the Institute of Geography, RAS and research project supported by the Russian Geographical Society (grant number 05/2017/РГО-РФФИ).

Литература

1. *Dolgova Ekaterina.* June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data // *Dendrochronologia.* 2016. V. 39. P. 17–23. www.elsevier.com/locate/dendro
2. *Жичкин А.П.* Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // *Метеорология и гидрология.* 2015. № 5. С. 52–62.
3. *Алексеев Г.В.* Арктическое измерение глобального потепления // *Лёд и Снег.* 2014. № 2 (126). С. 53–68.
4. *Коротков А.И., Федулов В.Е., Кораблев В.Е.* Детализированная схема распределения айсбергов в

References

1. *Dolgova Ekaterina.* June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia.* 2016, 39: 17–23. www.elsevier.com/locate/dendro
2. *Zhichkin A.P.* Long-term and seasonal anomalies of ice coverage in the Barents Sea. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 2015, 5: 52–62. [In Russian].
3. *Alekseev G.V.* Arctic dimension of global warming. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 2 (126): 53–68. [In Russian].
4. *Korotkov A.I., Fedulov V.E., Korabliov V.E.* Detailed scheme of iceberg distribution in the Southern Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 2014, 3 (101): 89–96, 111, 115. [In Russian].

- Южном океане // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 3 (101). С. 89–96, 111, 115.
5. The Swiss Glaciers. 2011/12 and 2012/13. Glaciological Report No 133/134 / Ed. A. Bauder. Cryospheric Commission (EKK) of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), 2016. 118 p.
 6. WGMS.ch/metadatabrowser.html
 7. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
 8. Global Land Ice Measurements / Eds.: S. Jeffrey, G.J. Kargel, M.P. Leonard, B.A. Kaab, B.Y. Raup. Berlin, 2014. 876 p.
 9. Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 264 с.
 10. Никитин С.А. Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 87–96.
 11. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 431 с.
 12. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я. Новые данные о современных изменениях ледников горных районов России // ДАН. 2015. Т. 464. № 6. С. 727–734.
 13. Буш Н.А. О состоянии ледников северного склона Кавказа в 1907, 1909, 1911 и 1913 годах // Изв. РГО. 1914. Т. 50. Вып. 9. С. 461–510.
 14. Бушуева И.С. Колебания ледников на Центральном и Западном Кавказе по картографическим, историческим и биоиндикационным данным за последние 200 лет: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2013. 24 с.
 15. Золотарев Е.А. О конечной «морене 30-х годов» и размерах ледника Джанкуат // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 177–183.
 16. Душкин М.А. Многолетние колебания ледников Актру и условия развития молодых морен // Гляциология Алтая. 1965. Вып. 4. С. 83–101.
 17. Галахов В.П., Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Окишев П.А., Севастьянов В.В., Севастьянова Л.М., Шантыкова Л.Н., Шуров В.И. Ледники Актру. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 119 с.
 18. Larocque S.J., Smith D.J. Little Ice Age glacial activity in the Mt. Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada // Canadian Journ. of Earth Sciences. 2003. V. 40. № 10. P. 1413–1436.
 19. Luckman B.H. The Little Ice Age in the Canadian Rockies // Geomorphology. 2000. V. 32. P. 357–384.
 20. Masiokas M.H., Rivera A., Espizua L.E., Villalba R., Delgado S., Aravena J.C. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past
 5. The Swiss Glaciers. 2011/12 and 2012/13. Glaciological Report No 133/134. Ed. A. Bauder. Cryospheric Commission (EKK) of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), 2016: 118 p.
 6. WGMS.ch/metadatabrowser.html
 7. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Murav'ev A.Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Sovremennnye izmeneniya lednikov gornyykh rayonov Rossii*. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press, 2015: 288 p. [In Russian].
 8. Global Land Ice Measurements. Eds.: S. Jeffrey, G.J. Kargel, M.P. Leonard, B.A. Kaab, B.Y. Raup. Berlin, 2014: 876 p.
 9. Solomina O.N. North Eurasia Mountain Glaciation during Holocene. Moscow: Nauchnyi mir, 1999: 264 p. [In Russian].
 10. Nikitin S.A. Regularities of the glacial ice distribution in the Russian Altai, storage and dynamics assessment. *Materialy Glytsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2009, 107: 87–96. [In Russian].
 11. Panov V.D. Evolution of present-day glaciation in the Caucasus. Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993: 431 p. [In Russian].
 12. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Murav'ev A.Ya. New data on current changes in the mountain glaciers of Russia. *Doklady Akademii Nauk*. Doklady Earth Sciences. 2015, 464 (2): 727–734.
 13. Bush N.A. State of glaciers on the northern slope of Caucasus in 1907, 1909, 1911 and 1913. *Izvestiya RGO*. Proc. of the Russian Geographical Society. 1914, 50 (9): 461–510. [In Russian].
 14. Bushueva I.S. Glacier fluctuations in the Central and Western Caucasus through the last 200 years according to cartographic, historical and bioindicated data. PhD Thesis. Moscow: Institute of Geography RAS, 2013: 24 p. [In Russian].
 15. Zolotarev E.A. On the terminal «moraine of the 1930s» and size of Djankuat Glacier. *Materialy Glytsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1999, 87: 177–183. [In Russian].
 16. Dushkin M.A. Long-term fluctuations of Aktru glaciers and conditions of evolution of young moraines. *Glytsiologiya Altaya*. Glaciology of Altai. 1965, 4: 83–101. [In Russian].
 17. Galakhov V.P., Narozhny Yu.K., Nikitin S.A., Okishev P.A., Sevastyanov V.V., Sevastyanova L.M., Shantyikova L.N., Shurov V.I. Aktru glaciers. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 119 p. [In Russian].
 18. Larocque S.J., Smith D.J. Little Ice Age glacial activity in the Mt. Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada. *Canadian Journ. of Earth Sciences*. 2003, 40 (10): 1413–1436.
 19. Luckman B.H. The Little Ice Age in the Canadian Rockies. *Geomorphology*. 2000, 32: 357–384.
 20. Masiokas M.H., Rivera A., Espizua L.E., Villalba R., Delgado S., Aravena J.C. Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. Pal-

- 1000 years // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2009. V. 281. P. 242–268.
21. Нарожный Ю.К. Ресурсная оценка и тенденции изменения ледников в бассейне Актру (Алтай) за последние полтора столетия // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 117–125.
 22. Нарожный Ю.К., Никитин С.А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 93–101.
 23. Ruddell A. An inventory of present glaciers on Heard Island and their historical variations // *Heard Island: Southern Ocean Sentinel* / Eds.: K. Green and E. Woehler, Surrey Beatty & Sons, Chipping Norton, New South Wales, Australia, 2006. P. 28–51.
 24. Хруцкий В.С., Голубева Е.И. Динамика ледников горного узла Турген-Хархира (Западная Монголия) // *География и прир. ресурсы*. 2008. № 3. С. 145–156.
 25. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // *Лёд и Снег*. 2012. № 2 (118). С. 15–22.
 26. Ceballos J.L., Euscategui C., Ramirez J., Canon M., Huggel C., Haerberli W., Machguth H. Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 43. P. 194–201.
 27. Global Glacier Changes: facts and figures. UNEP, WGMS, 2007. 88 p.
 28. Leclercq P.W., Oerlemans J., Basagic H.J., Bushueva I., Cook A.J., Bris R.Le. A data set of worldwide glacier land fluctuations // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 659–672. www.the-cryosphere.net/8/659/2014/doi:10.5194/ts-8-659-2014
 29. Harris U. Heard Island Digitizing 2009. CAASM Metadata, Australian Antarctic Division Data Centre, Kingstone, Tasmania, Australia. Available at <http://data.aad.gov.au/aadc/metadata/> [Catalogue of Australian Antarctic and Subantarctic]
 30. Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Сыромятина М.В., Курочкин Ю.Н. Современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола // *Роль снега и льда в природе и жизни людей: Тез. гляциол. симпозиума 15–17 января 2014 г. Новосибирск*. 2014. С. 85–86.
 31. Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Зелепукина Е.С., Амосов М.И., Волков И.В., Глебова А.Г., Гузель Н.И., Журавлев С.А., Прудникова Т.Н., Пряхина Г.В. Горный массив Монгун-Тайга. СПб.: Арт-Экспресс, 2012. 310 с.
 32. Троицкий Л.С., Ходаков В.Г., Михалев В.И., Гуськов А.С., Лебедева И.М., Адаменко В.Н., Живкович Л.А. Оледенение Урала. М.: Наука, 1966. 306 с.
 33. Материалы наблюдений на горно-ледниковых бассейнах МГД в Советском Союзе: Вып. 2. 1969–1974. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 302 с.
 - aeogeography, *Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2009, 281: 242–268.
 21. Narozhny Yu.K. Resource assessment and trends of glacier variations in the Aktru Basin (Altai) over the last 150 years. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 117–125. [In Russian].
 22. Narozhny Yu.K., Nikitin S.A. Recent glaciation in Altai at the beginning of 21th century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2003, 95: 93–101. [In Russian].
 23. Ruddell A. An inventory of present glaciers on Heard Island and their historical variations. *Heard Island: Southern Ocean Sentinel*. Eds. K. Green and E. Woehler. Surrey Beatty & Sons, Chipping Norton, New South Wales, Australia, 2006: 28–51.
 24. Khrutsky V.S., Golubeva E.I. Dynamics of the glaciers of the Turgen-Kharkhira mountain range (Western Mongolia). *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2008, 3: 145–156.
 25. Zolotarev E.A., Kharkovets E.G. Evolution of Mount Elbrus glaciation after the Little Ice Age. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 2 (118): 15–22. [In Russian].
 26. Ceballos J.L., Euscategui C., Ramirez J., Canon M., Huggel C., Haerberli W., Machguth H. Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*. 2006, 43: 194–201.
 27. Global Glacier Changes: facts and figures. UNEP, WGMS, 2007: 88 p.
 28. Leclercq P.W., Oerlemans J., Basagic H.J., Bushueva I., Cook A.J., Bris R.Le. A data set of worldwide glacier land fluctuations. *The Cryosphere*. 2014, 8: 659–672. www.the-cryosphere.net/8/659/2014/doi:10.5194/ts-8-659-2014
 29. Harris U. Heard Island Digitizing 2009. CAASM Metadata, Australian Antarctic Division Data Centre, Kingstone, Tasmania, Australia. Available at <http://data.aad.gov.au/aadc/metadata/> [Catalogue of Australian Antarctic and Subantarctic]
 30. Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Syromyatina M.V., Kurochkin Yu.N. Present-day state and dynamics of glacial-nival systems in Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola massifs. *Rol' snega i l'da v prirode i zhizni lyudey*. Role of snow and ice in the nature and life of people. Theses of Glaciological Symposium. January 15–17, 2014. Novosibirsk. 2014: 85–86. [In Russian].
 31. Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Moskalenko I.G., Zelepukina E.S., Amosov M.I., Volkov I.V., Glebova A.G., Guzel' N.I., Zhuravlev S.A., Prudnikova T.N., Pryakhina G.V. Mongun-Taiga mountain massif. *Sankt-Petersburg: Art-Express*, 2012: 310 p. [In Russian].
 32. Troitsky L.S., Khodakov V.G., Mikhalev V.I., Gus'kov A.S., Lebedeva I.M., Adamenko V.N., Zhivkovich L.A. Glaciation of the Urals. Moscow: Nauka, 1966: 306 p. [In Russian].
 33. Observational data on mountain-glacier basins of the Soviet Union under the International Hydrological Decade Programme. Is. 2: 1969–1974. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 302 p. [In Russian].

34. Иванов М.Н. Эволюция оледенения Полярного Урала в позднем голоцене. М.: изд. МГУ, 2013. 200 с.
35. Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д. Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI вв. // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4-480-492.
36. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 119 с.
37. Голуб Н.В., Муравьев Я.Д. Баланс массы и колебания ледника Кропоткина (вулкан Большой Семьячик, Восточная Камчатка) и их связь с климатом // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 26–31.
38. Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А. Толщина льда, объем и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шийрак, внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 3. С. 91–100.
39. Котляков В.М. Снежный покров и ледники Земли. Избранные сочинения: Кн. 2. М.: Наука, 2004. 448 с.
40. Нарожный Ю.К. Внешний массообмен ледников Актру: методика наблюдений, тенденции изменения и климатическая обусловленность // Вестн. Томского гос. ун-та. 2001. № 274. С. 13–23.
41. Ревякин В.С., Мухаметов Р.М. Сокращение ледниковой системы Купол – Малый Актру на Алтае за период 1952–1979 гг. // МГИ. 1981. Вып. 41. С. 187–190.
42. Михалев В.И., Цветков Д.Г., Шумский П.А. К методике изучения механизма колебаний ледников (на примере ледника Обручева, Полярный Урал) // МГИ. 1972. Вып. 19. С. 221–236.
43. Шумский П.А., Михалев В.И., Цветков Д.Г. Колебания ледника Обручева (Полярный Урал), их механизм и причины. Кинематика поверхности // МГИ. 1972. Вып. 20. С. 35–70.
44. Котляков В.М., Чернова Л.П., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М. Подвижки ледников и ледниковые катастрофы // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 93–97.
34. Ivanov M.N. Evolution of glaciation of the Polar Urals in the late Holocene. Moscow, 2013: 200 p. [In Russian].
35. Murav'ev A.Ya., Murav'ev Ya.D. Glacier oscillations on the Klyuchevskaya volcanic group in the second half of XX century and the beginning of XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (4), 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4-480-492. [In Russian].
36. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. Kozelsky Glacier (Avacha volcanoes group). Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat. 1992: 119 p. [In Russian].
37. Golub N.V., Muraviev Ya.D. Mass balance and fluctuations of the Kropotkin Glacier (Bolshoy Semyachik Volcano, Eastern Kamchatka) and their relation to climate. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 99: 26–31. [In Russian].
38. Petrakov D.A., Lavrentiev I.I., Kovalenko N.V., Usubaliev R.A. Ice thickness, volume and modern changes of area of the Sary-Tor Glacier (Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan). *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2014, 18 (3): 91–100. [In Russian].
39. Kotlyakov V.M. Snow Cover and Glaciers of the Earth. Selected Works: Book 2. Moscow: Nauka, 2004: 448 p. [In Russian].
40. Narozhny Yu.K. Mass balance of the Aktru glaciers: methods of observations, trends of changes and dependence on climate. *Vestnik Tomskogo Universiteta*. Herald of the Tomsk State University. 2001, 274: 13–23. [In Russian].
41. Revyakin V.S., Mukhametov R.M. Reduction of the Kupol and Maliy Aktru glacier system, Altai, over 1952–1979. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1981, 41: 187–190. [In Russian].
42. Mikhalev V.I., Tsvetkov D.G., Shumsky P.A. On the methods to study the mechanism of glacier fluctuations (Obruchev Glacier in Polar Urals as an example). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1972, 19: 221–236. [In Russian].
43. Shumsky P.A., Mikhalev V.I., Tsvetkov D.G. Variations of the Obruchev Glacier (Polar Urals), their mechanism and causes. Surface kinematics. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1972, 20: 35–70. [In Russian].
44. Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Khomova T.E., Zverkova N.M. Glacier surges and glacial disasters. *Doklady Akademii Nauk*. Doklady Earth Sciences. 2017, 472 (1): 93–97.