

Палеогляциология

УДК 551.324.63

Колебания ледников в голоцене и возможное влияние на них орбитального сигнала, солнечной и вулканической активности и антропогенного воздействия

© 2014 г. О.Н. Соломина

Институт географии РАН, Москва, Томский государственный университет
olgasolomina@yandex.ru

Holocene glacier variations and their potential orbital, solar, volcanic and anthropogenic forcings

O.N. Solomina

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow; Tomsk State University

Статья принята к печати 3 июня 2014 г.

*Антропогенное воздействие на климат, вулканическая активность, голоцен, колебания ледников, орбитальный сигнал, солнечная активность.
Anthropogenic forcings, glacier fluctuations, Holocene, orbital forcing, solar activity, volcanic forcings.*

Амплитуда наступаний ледников в голоцене в Северном полушарии в целом увеличивалась, а в Южном — уменьшалась. Этот тренд объясняется изменениями инсоляции, связанными с орбитальными параметрами Земли. Исключение из этого правила — некоторые районы Центральной Азии, где размеры ледников в голоцене уменьшались. 10–4 тыс. л.н. и в течение первого тысячелетия н.э. (примерно до начала XIII в.) размеры ледников были близки к современным или были меньше их. Этот тренд подтверждается данными о колебаниях верхней и северной границ леса в Северном полушарии в голоцене. Период (7–5 тыс. л.н.), когда ледники имели небольшие размеры, а их наступание почти нигде не зафиксировано, совпадает с периодом отсутствия крупных эксплозивных извержений и низкой солнечной активности. Раннеголоценовые морены (период от 11,1 до 8,1 тыс. л.н.) объединяются в несколько групп и совпадают с циклами Бонда (11,1; 10,3; 9,4; 8,1 тыс. л.н.) и крупными вулканическими извержениями (11,0; 9,5–9,7; 9,1–9,3; 8,0–8,1 тыс. л.н.). Из-за совпадения некоторых извержений с циклами Бонда (которые в свою очередь совпадают с минимумами солнечной активности) влияние вулканической деятельности и солнечной активности трудно разграничить. Влияние солнечной и вулканической активности на поведение ледников в среднем голоцене неочевидно, но в последние два тысячелетия (событие 1,4 тыс. л.н. и малый ледниковый период) корреляция вновь становится заметной. Современное отступление ледников не согласуется с современным орбитальным сигналом, но связано с ростом солнечной активности и концентрации парниковых газов. Колебания ледников в разных районах не обнаруживают глобальной синхронности и строгой периодичности в течение голоцена. Однако отсутствие таких свидетельств может быть связано также с ограничением данных о колебаниях ледников (дискретные ряды, неполнота данных, низкая точность датирования, влияние температуры и осадков на колебания ледников др.).

Early Holocene glacier advances in several regions correspond to Bond's cycles (11.1, 10.3, 9.4, 8.1 ka BP) and climatically effective volcanic eruptions (11.0, 9.5–9.7, 9.1–9.3, 8.0–8.1 ka BP). Orbital forcing over the Holocene is driving the long-term glacier variation trends in the high and mid latitudes of the Northern Hemisphere. In these regions glaciers were generally smaller than now until the beginning of the Neoglacial period (ca 4.0 ka BP). Modern rapid global glacier retreat disagrees with the orbital forcing and is most probably driven by both increase of solar activity and anthropogenic impact.

Введение

Сокращение размеров ледников во всех без исключения горных районах мира, происходящее в последние десятилетия [56], остро ставит вопрос о причинах этого глобального процесса. Важный аспект проблемы — определение вклада естественных и антропогенных факторов, влияющих на современный климат и вызывающих уменьшение размеров оледенения. При решении этой проблемы ключевую роль играют достоверные и надёжные реконструкции поведения ледников в голоцене — т.е. в период, когда внешние условия (очертания материков и океанов, отсутствие больших ледниковых покровов в Северном полушарии, циркуляция атмосферы) были примерно такие, как сейчас. В настоящее время при отступа-

нии ледников из-под льда вытаскивают органические остатки (растительный детрит, макроостатки древесины, археологические артефакты), которые свидетельствуют о меньших размерах оледенения в прошлом. Есть достоверные свидетельства, что в некоторые периоды голоцена, особенно в его начале и середине, ледники были меньше, чем в конце XX в., однако точный размер ледников в прошлом определить трудно.

В последние годы достигнуты заметные успехи в области изучения голоценового оледенения. Это стало возможно, в частности, благодаря новым технологиям датирования ледниковых отложений с помощью космогенных изотопов (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl) [19, 29, 35, 52]. В отличие от традиционного радиоуглеродного датирования эти методы позво-

ляют получить датировки именно для морен, а не для периодов, благоприятных для формирования органических отложений. Разумеется, это не означает, что традиционные радиоуглеродные датировки больше не используются для палеоклиматических реконструкций. Напротив, в сочетании с дендрохронологическим методом они позволяют существенно уточнить детали голоценовых колебаний ледников во многих районах, в частности в Альпах [28], в Канадских Кордильерах [41], на Алтае [2]. Особенно важно, что такие реконструкции выполнены в районах, ранее слабо изученных, — в тропиках и Южном полушарии [19, 29, 35, 52]. Важно, однако, учитывать появившиеся недавно сведения о более низкой, чем считалось ранее, скорости накопления космогенных изотопов в низких широтах, что означает удревание возраста морен на 10–15%.

Новый подход к гляциологическим реконструкциям развивается на основе анализа озёрных отложений, связанных с колебаниями ледников. Он позволяет получать непрерывные данные о динамике высоты границы питания ледников [9, 33, 39]. Важные результаты о колебаниях шельфовых ледников в прошлом получены и на основе анализа морских отложений [16, 22, 23]. Основные задачи настоящей работы — анализ обновлённой базы данных о колебаниях ледников в голоцене и их сопоставление с климатическими «форсингами» — орбитальным, солнечным, вулканическим и антропогенным сигналами. В этой статье приводятся только откалиброванные радиоуглеродные датировки с поправками на резервуарный эффект (где это необходимо). Датировки по космогенным изотопам цитируются в том виде, в каком они опубликованы в оригинальных работах (т.е. с уже внесёнными поправками на освещённость и пр.). Все датировки, маркированные как тысячи лет назад, относятся к калиброванным и отсчитываются от 1950 г.

Районы

В обзоре мы воспользовались делением на ледниковые районы, предложенным в последнем отчёте Межправительственной Комиссии Экспертов по изменению климата [56] (рис. 1). Небольшие различия связаны с тем, что для некоторых выделенных районов голоценовых данных немного, поэтому некоторые районы пришлось объединить (Канадская Арктика, юг Азии). Антарктика, напротив, по понятным причинам разделена на три региона (Восточная, Западная, Антарктический полуостров и острова).

Состояние проблемы

Существует несколько сводок, обобщающих хронологию наступания ледников в голоцене на глобальном и региональном уровнях (табл. 1), которые свидетельствуют, что за последние годы достигнут существенный прогресс в детальности и надёжности реконструкций. Однако, несмотря на это, до сих пор не удаётся определённо судить, насколько синхронными были наступания в разных районах и с какими причинами они были связаны. В исследовании [57] авторы проанализировали пространственную изменчивость температур, осадков и состояния горных ледников для пяти преимущественно холодных эпизодов голоцена (8150–8250, 6950–7050, 6300–6400, 2800–2900 л.н., около 1000 л.н., 700–800 л.н.) и установили, что эти периоды характеризовались относительно низкой солнечной активностью. Вместе с тем они не отличались глобальным понижением температуры и повсеместными наступаниями ледников. Вопрос о синхронности или асинхронности колебаний ледников Южного полушария и Европы в голоцене также дискуссионен [52, 59], поскольку точность датировок морен ещё недостаточна для однозначного толкования полученных результатов. Некоторые авторы считают, что из-за низкой точности датирования мы вообще пока не можем рассчитывать на однозначный ответ о синхронности–асинхронности колебаний ледников в Северном и Южном полушариях [59].

Означает ли это, что попытки поиска закономерностей в голоценовых колебаниях ледников обречены на неудачу? Мы полагаем, что нет, так как в последние годы ситуация несколько изменилась. Во-первых, стали широко применяться методы датирования по космогенным изотопам, которые позволяют датировать собственно морены, т.е. наступания ледников. Во-вторых, появилось много данных по озёрным отложениям, которые дают возможность получить непрерывную летопись изменений ледников, причём не только их наступаний, но и отступаний. И, наконец, в результате отступления в последние десятилетия ледников обнажаются органические остатки, датирование которых даёт информацию о размерах ледников в прошлом.

В этой работе представлен обзор новых данных о колебаниях ледников в голоцене, рассмотрены не только традиционные свидетельства о наступаниях ледников, но и данные о периодах отступления ледников, поскольку именно такое состояние криосферы является аналогом современного состояния. Эти данные сопоставляются с реконструкциями положения верхней и северной

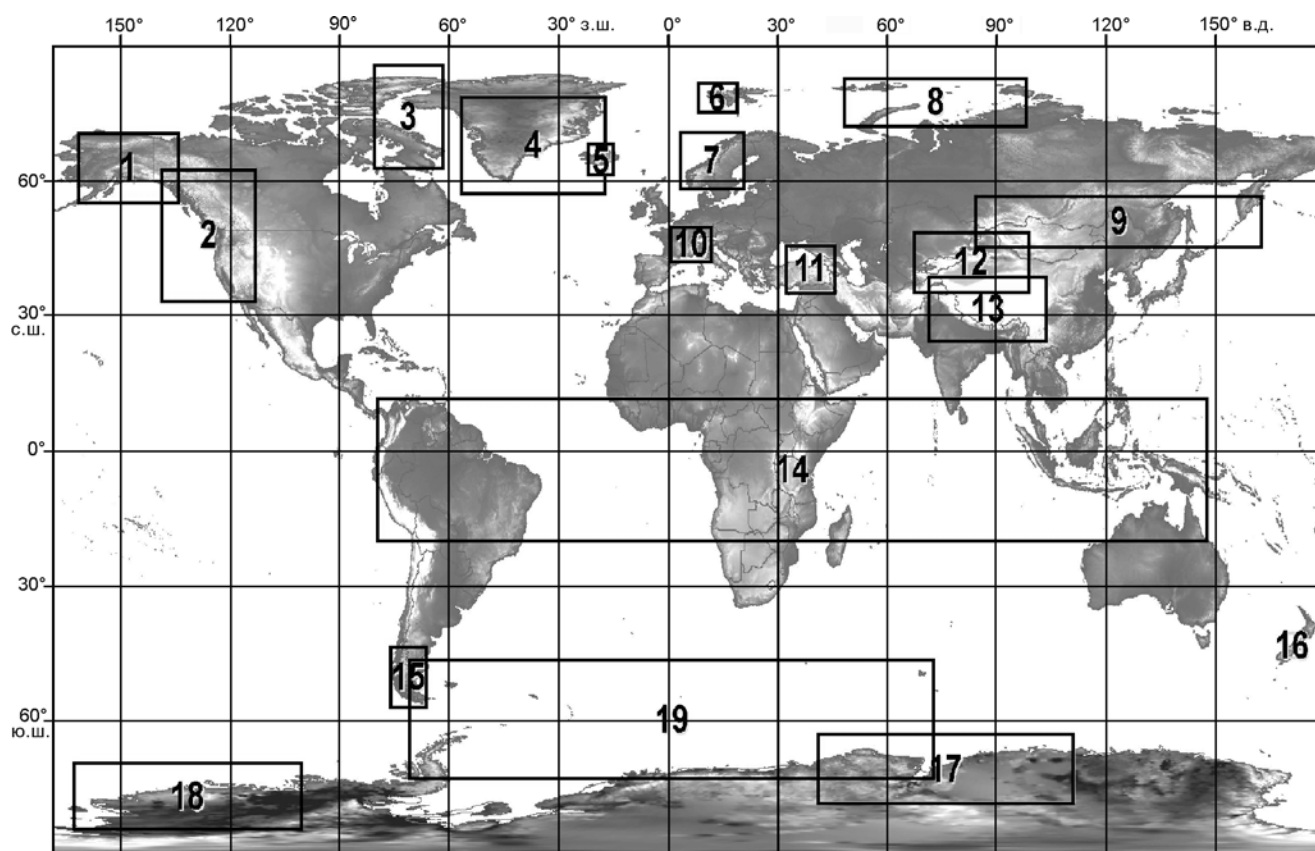


Рис. 1. Подразделение на ледниковые районы [56].

Районы: 1 – Аляска; 2 – Запад Канады и США; 3 – Канадская Арктика; 4 – Гренландия; 5 – Исландия; 6 – Шпицберген; 7 – Скандинавия; 8 – Российская Арктика; 9 – Север Азии; 10 – Центральная Европа; 11 – Кавказ и Ближний Восток; 12 – Центральная Азия; 13 – Южная Азия; 14 – низкие широты; 15 – Южные Анды; 16 – Новая Зеландия; 17 – Восточная Антарктика; 18 – Западная Антарктика; 19 – Субантарктика и Антарктический полуостров

Fig. 1. The regional divisions [56].

1 – Alaska; 2 – Western Canada and US; 3 – Arctic Canada; 4 – Greenland; 5 – Iceland; 6 – Svalbard; 7 – Scandinavia; 8 – Russian Arctic; 9 – North Asia; 10 – Central Europe; 11 – Caucasus and Middle East; 12 – Central Asia; 13 – South Asia West; 14 – Low Latitudes; 15 – Southern Andes; 16 – New Zealand; 17 – East Antarctic; 18 – West Antarctic; 19 – Subantarctic and Antarctic Peninsula

Таблица 1. Периоды наступания ледников в голоцене по данным разных авторов (в скобках – некалиброванный радиоуглеродный возраст)

Время, тыс. л.н.	По всему миру					Южное полушарие [49]	Северная Америка	
	[15]	[21]	[32]	[40]	[51]		[48]	[50]
10	10 300		10100–9900					
9			9200–9100	9000–8000	9600–9200 (8400)			
8			8600–8100		8500–8100 (7500)			
7	7800		7400–6900		7500–7000 (6300)			
6		6200–6000	6500–6000	6000–5000	6300–5700 (5200)			
5	5300		5700–5500		5600–5000 (4600)	5400–4900 (неогляциал)	5600 (4600)	
4			4900–4500	4200–3800	4500–3700 (3700)			4800–4100
3		3800–3100	4000–3700; 3400–3000	3500–2500	3700–3100 (3200)			3300–2700
2	2800	3000–2300	2600–2300		3200–2200 (2700); 2200 (2500–1900)		3000 (2600–2800)	2400–2000
1		1600–1200	1800–1600; 1400–1200	1200–1000	1700–1050			1500–1100
	200–300	1280–1850	1000–900; 700–600; 400–100	600–150	900–500; 350–100			800–100

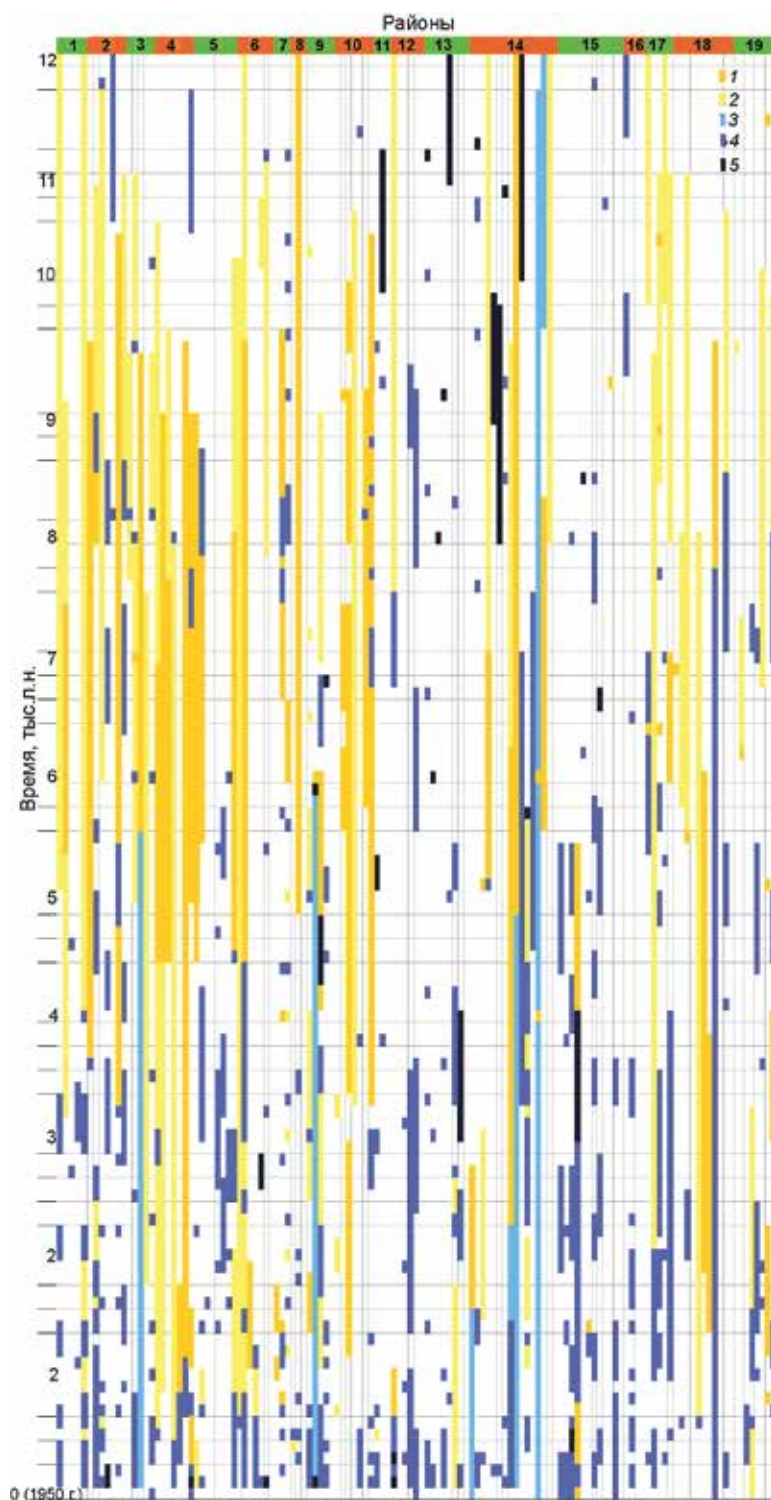


Рис. 2. Колебания ледников в голоцене.

1 — ледники меньше современных или близки к ним по размерам; 2 — ледники отступали, но их размеры не известны; 3 — ледники существуют, но сведений об их состоянии нет; 4 — ледники наступают; 5 — максимальное по масштабам наступание ледников; вверху даны номера районов, их названия — см. рис. 1

Fig. 2. Glacier fluctuations in the Holocene.

1 — glaciers are smaller or equal to the modern ones; 2 — glaciers were retreating but the precise sizes are unknown; 3 — the glaciers existed, but there is no information on their sizes; 4 — glaciers advanced; 5 — maximum glacier advances in the Holocene; glaciers regions are in the upper column, their names — see Fig. 1.

границ леса. В последней части статьи обсуждаются возможные климатические причины колебаний ледников в разные эпохи голоцена.

Результаты. Голоценовые колебания ледников

Хронологии колебаний отдельных ледников и районов оледенения. На рис. 2. в схематическом виде представлены данные о колебаниях голоценовых ледников за последние 12 тыс. лет. В эту базу данных включены ледниковые хронологии как по отдельным долинам, так и обобщения по районам. Из рис. 2 видно, что на протяжении длительного периода в середине голоцена примерно от 8 до 5 тыс. л.н. многие ледники были меньше современных. Особенно ясно выражен этот период в Северном полушарии, в меньшей степени — в Антарктике и, по-видимому, совсем не выражен в Центральной Азии. На рис. 2 хорошо видно и начало «неогляциала», т.е. периода увеличения частоты и интенсивности наступаний ледников в последней трети голоцена, причём на территории всего земного шара. Интересно, что и в период неогляциала выделяются несколько интервалов «малого оледенения», в том числе наиболее заметный и длительный — с начала 1-го тысячелетия н.э. примерно до XII–XIII вв. И этот период также лучше выражен в Северном полушарии, однако его следы наблюдаются и на Антарктическом полуострове, и на некоторых островах в Субантарктике.

Вывод о сокращении ледников в первой половине голоцена подтверждается данными о динамике верхней границы леса (рис. 3). Находки макроостатков древесины выше современной границы леса относятся к самому началу голоцена, причём многие из этих остатков найдены на предположительно отступающих ледниках. Особенно много таких находок известно в Альпах [26, 28], в Скалистых горах [41] и на Алтае [2]. Они показывают, что высота верхней границы леса в Канадских

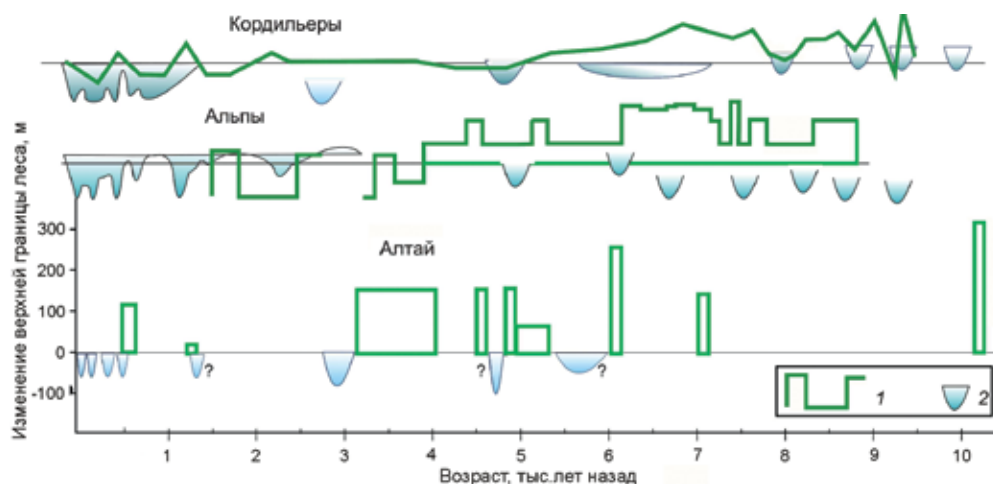


Fig. 3. Колебания верхней границы леса и наступания ледников.

1 — положение верхней границы леса относительно современной (соответственно выше и ниже горизонтальной линии): для Кордильер и Альп — в условной шкале, для Алтая — в отклонениях от современного положения; 2 — периоды активизации горных ледников в Кордильерах [41], Альпах [28] и на Алтае [2]: голубые значки ниже горизонтальной линии обозначают наступания ледников, во время которых ледники были больше современных, выше горизонтальной линии — небольшие наступания, во время которых ледники не превосходили по масштабам современные

Fig. 3. Upper tree limit variations and glacier advances.

1 — location of the upper tree limit in respect of its modern position (upper and lower the horizontal line) for the American Cordillera and the Alps in a relative scale, in deviation from the modern position for Altai; 2 — periods of activity of mountain glaciers in American Cordillera [41] and the Alps [28] and in Altai [2]: blue symbols below the horizontal line mark the glacier advances, those upper the horizontal lines — glacier advances within the modern limits

Кордильерах, в Альпах и на Алтае была в тот период выше, а затем, 3–4 тыс. л.н., понизилась, в то время как размеры оледенения, напротив, увеличились. Поскольку во всех трёх рассматриваемых на рис. 3 районах высота границы леса зависит главным образом от теплообеспеченности, можно сделать вывод, что и соответствующие периодам подъёма границы леса этапы «малого оледенения» связаны именно с летней температурой, а не с дефицитом осадков. Характерно, что в данных по динамике границы леса отражён и второй период малого оледенения: первое — начало второго тысячелетия новой эры. В работе [47] авторы сообщают также о многочисленных археологических находках в высокогорьях Альп (район Шнидейох) 7–4,5 тыс. л.н. и в первом тысячелетии н.э. Нетрудно заметить, что конец второго периода совпадает с окончанием средневековой климатической аномалии, когда климат, по крайней мере, в Европе, был тёплым (950–1250 гг.) [37].

Основная тенденция, которая прослеживается в Северном полушарии для данных о размерах и частоте наступания ледников (увеличиваются и становятся чаще), а также о положении верхней границы леса (понижается), свидетельствует о направленном тренде к похолоданию, который изменился всего 100–150 л.н. В Южном полушарии в целом этот тренд

имеет противоположную направленность: в течение голоцена здесь происходит постепенное сокращение размеров ледников (систематические данные о верхней границе леса отсутствуют). Считается, что эти тенденции объясняются противоположными трендами в теплообеспеченности, связанными с орбитальным сигналом (прецессия) [56]. Вопреки этой основной тенденции (увеличение размеров ледников в Северном полушарии), на юге Гималаев ледники имели наибольшие размеры в начале голоцена [53]. Существует несколько возможных объяснений этому феномену, в частности, утверждается, что уменьшение размеров ледников может быть связано с иссушением климата и ослаблением Индийского муссона, которое наблюдалось в течение голоцена.

Региональные обобщения данных о наступаниях ледников. Провести анализ синхронности отдельных наступаний ледников по районам на основе рис. 2 невозможно. Этому, прежде всего, препятствует низкая точность датировок во многих районах. Кроме того, в этой выборке присутствуют самые разные ледники, включая, например, шельфовые и даже, возможно, пульсирующие. Для анализа внутривековых колебаний ледников мы воспользуемся табл. 2, где представлены результаты региональных обобщений наступаний ледников. Из неё видно, что многие наступания ледников распределены во

Таблица 2. Наступания горных ледников по районам (в скобках – число районов, где отмечалось наступание)

Время, тыс. л.н.	Баффин-нова Земля [42, 43, 10]	Гренландия [30, 60]	Скандинавия (в целом) [45]	Южная Норвегия [39]	Исландия [18, 31, 34, 55]	Альпы [25, 27, 28, 46]	Запад Канады [41]	Тибет [53]	Тропические Анды		Новая Зеландия [52]	Период наступаний ледников, тыс. л.н.
									[3, 19, 35, 38,]	[29]		
11		11,0–11,3	11,2	11,1	11,1	11,3 ± 0,9		11,2	11,3			11,3–11,1 (7)
10			10,5	10,5		10,5			10,8–10,7	10,8 ± 0,9		10,8–10,5 (5)
			10,1	10,0				10,2				10,2–10,0 (3)
9			9,7	9,7					9,9–9,7			9,9–9,7 (3)
9	9,2	9,2	9,2							9,3 ± 0,8		9,3–9,2 (4)
8						8,85	8,6–8,2	8,4		8,5 ± 0,4		8,8–8,4 (4)
	8,2	8,2–8,0		8,2	8,7–7,9	8,4			8,0–7,6			8,1–8,2 (3)
7				7,7		7,7						7,7 (2)
6						7,2–6,8	7,4–6,5					
						6,6		6,7			6,5	6,5–6,7 (4)
5			5,6		5,7–5,2	5,8						5,2–5,8 (4)
						5,6			5,1			
4					4,7		4,9		4,8			4,9–4,7 (3)
			4,4	4,3	4,2		4,2	4,2				4,2–4,4 (6)
3	3,5			3,6	3,8–3,2	3,8–3,4					3,6–3,2	3,8–3,2 (7)
2			3,3			3,0–2,6	3,5–2,8	3,3				
				2,6	2,9							3,0–2,6 (4)
1	2,3		2,3	2,1	2,6–2,0				2,3		2,3	2,2–2,1 (5)
			1,6	1,7	1,9		1,7–1,3					1,9–1,6 (4)
	1,4			1,4	1,4			1,4	1,5–1,4		1,4	1,4 (7)
	1,0	МЛП*	МЛП	1,0	МЛП	1,1–1,0	1,0	МЛП	МЛП	МЛП	МЛП	1,0 (4), 0,8–0,1 (11)

*МЛП – малый ледниковый период.

времени не хаотично, а объединяются в группы. Их датировки представлены по последней колонке, в скобках после дат указано число районов, где они зафиксированы. Считается, что колебания ледников большой амплитуды в раннем голоцене были связаны с дегляциацией и периодическим поступлением больших порций холодной пресной воды в Северную Атлантику [11–13]. В частности, к таким событиям относятся похолодание [4] и наступание ледников 8,2 тыс. л.н., которое имело место, прежде всего, в Северной Атлантике и в высоких широтах Западного полушария. Наступания этого времени в Центральной Азии, в Альпах и в тропических Андах датированы менее надёжно и, возможно, связаны с другими причинами. Однако причины большинства раннего голоценовых похолоданий и наступаний ледников достоверно неизвестны.

Другие возможные и наиболее вероятные причины крупных голоценовых похолоданий и связанных с ними наступаний ледников – изменения солнечной активности и климатически эффективные эксплозивные извержения вулканов. В табл. 3 сопоставлены голоценовые наступания ледников, даты таких извержений [7, 17], циклы Бонда [8] и периоды основных голоценовых похолоданий, выделенных на основе сотен кривых, построенных по

косвенным данным (годовые кольца, озёрные и морские осадки, исследования кораллов и пр.) [57]. Как известно, крупные эксплозивные извержения приводят к летним похолоданиям, к которым чувствительно и большинство ледников. Циклами Бонда называют 1500-летнюю периодичность в выпадении айсберговых осадков в Северной Атлантике. Эта периодичность, по мнению Бонда, связана с похолоданиями, которые вызываются циклом солнечной активности соответствующей продолжительности [8]. На эти процессы существенно влияют также процессы в системе океан–атмосфера [14].

Сопоставление показывает, что имеется тенденция совпадения как минимум пяти периодов наступаний ледников (не считая малого ледникового периода) с датами извержений – 11,1; 9,5–9,7; 9,1–9,3; 8,0–8,1; 1,3–1,5 тыс. л.н., которые установлены по данным ледниковых кернов в Гренландии и Антарктике. Первые четыре относятся к раннему голоцену, а последнее совпадает с самым заметным наступанием на фоне тёплого периода первого тысячелетия н.э. Разумеется, при относительной точности датировок в несколько столетий нельзя исключать и случайности указанных совпадений, однако данные о последнем тысячелетии, для которого многие датировки ледниковых отложений имеют более

высокую точность, свидетельствуют о возможности корреляций климатически эффективных вулканических извержений и наступаний ледников. Так, по результатам датирования колебаний края ледниковых шапок в Канадской Арктике [44], наступание ледников малого ледникового периода началось в этих районах внезапно между 1275 и 1300 гг., а затем усилилось в период 1430–1455 гг. Оба эти периода совпадают с пятидесятилетиями наибольшей за всё тысячелетие вулканической активности. При этом холодные летние сезоны вызвали увеличение площади морского льда в Арктике, что, в свою очередь, обеспечило положительную обратную связь и привело к дальнейшему похолоданию.

Практически все пики в циклах Бонда совпадают с датами наступаний ледников. Поскольку циклы Бонда связаны с похолоданиями в Северной Атлантике, такая корреляция неудивительна. Совпадение некоторых циклов Бонда с вулканическими извержениями может означать, что соответствующие похолодания, вероятно, вызваны сочетанием двух причин — уменьшением солнечной активности и сильным, но краткосрочным климатическим эффектом от извержений. Связанные с этим увеличение площади морского льда в Северном полушарии и рост альбедо (положительная обратная связь) могут существенно усилить начальное возмущение и привести к длительным похолоданиям глобального масштаба [44].

Многие авторы ссылались на колебания солнечной активности как на возможную причину колебаний ледников, однако из-за низкой точности датирования морен и противоречивых представлений об амплитуде колебаний солнечной активности в голоцене [56] эти совпадения трудно доказать, особенно без соответствующего сопровождения путём моделирования. Интересно, что уменьшение солнечной активности между 8 и 5 тыс. л.н. соотносится не с периодом активизации ледников, что было бы логично, а с периодом «малого оледенения», причём не только в Северном, но и в Южном полушарии. В этот же период отмечалась и слабая вулканическая активность (эксплозивные, климатически эффективные извержения отсутствуют, за исключением одного события 7,1 тыс. л.н.). Возможно, именно отсутствием таких извержений как «спусковых крючков» для похолоданий и объясняется этот парадокс.

Сравнение внутривековой изменчивости солнечной активности с колебаниями ледников пока не даёт обнадеживающих результатов. Лишь в последние 3–4 тыс. лет намечается некоторое соответствие между низкой активностью Солнца и наступаниями ледников, причём в период 3000–500 л.н.

Таблица 3. Сопоставление периодов наступаний ледников с датами крупных эксплозивных извержений, циклами Бонда и похолоданиями в голоцене (в скобках – число наступаний ледников)

Наступания ледников, тыс. л.н.	Даты эксплозивных извержений	Циклы Бонда	Похолодания, по [57]
11,3–11,1 (7)	11,1–11,0	11,1	
10,8–10,5 (5)			
10,2–10,0 (3)		10,3	
9,9–9,7 (3)	9,5–9,7		
9,3–9,2 (4)	9,1–9,3	9,4	
8,8–8,4 (4)			
8,1–8,2 (3)	8,0–8,1	8,1	8,2
7,7 (2)			
	7,1		
6,5–6,7 (4)			
			6,3
5,2–5,8 (4)		5,9	
4,9–4,7 (3)			4,7
4,2–4,4 (6)	4	4,2	
3,8–3,2 (7)	3,4		
	3,1		
3,0–2,6 (4)		2,8	2,7
2,2–2,1 (5)			
1,9–1,6 (4)			
1,4 (7)	1,3–1,5 (3)	1,4	1,5
1,0 (4), 0,8–0,1 (11)	0,7, 0,5, 0,1 (3)		0,5

Все датировки — в тысячах лет до 1950 г.

(до малого ледникового периода) в наступаниях ледников наблюдается цикл, близкий к 208-летнему солнечному циклу де Врие. Для последних двух тысячелетий по некоторым районам созданы более точные хронологии колебаний ледников, основанные на результатах перекрёстного датирования годичных колец, и они позволяют сделать более определённые выводы о синхронности наступаний ледников в Северном полушарии. Так, наступания около 200, 400, 600, 800–900, 1100, 1300 гг. и в XVII–XIX вв. отмечались в Альпах, на Аляске и в Южном Тибете [54]. Именно эти колебания могут быть связаны с указанным циклом солнечной активности [25, 36, 58]. Высказывается, однако, мнение, что эти флуктуации определяются в значительной мере колебаниями северо-атлантического индекса [45]. 200-летний ритм, появившийся в период примерно с 3000 до 700–500 л.н., нарушается с наступлением малого ледникового периода. Если принять гипотезу о доминирующем влиянии вулканов на похолодание малого ледникового периода, то этот сбой ритма получает своё логическое объяснение.

Поведение современных ледников в контексте голоценовых колебаний климата. Описанные здесь особенности голоценовой ледниковой истории дают возможность рассмотреть в новом свете особенности поведения современных ледников. Как известно, последние 100–150 лет площадь ледников на земном

шаре сокращается. Особенно заметна эта тенденция в последние десятилетия. Короткие периоды стабилизации и даже наступаний не меняют общей картины. Исследования показывают, что современное сокращение и даже распад отдельных шельфовых ледников имеет беспрецедентный характер, поскольку впервые за период голоцена он происходит одновременно в Арктике и Антарктике, и темпы деградации ледников очень велики [6, 24]. Самый длительный период сокращения оледенения соотносится с эпохой высокой инсоляции в первой половине голоцена. По расчётам [20], ледники в Альпах в голоcene были больше современных на протяжении около 4,5 тыс. лет и меньше — примерно в течение 6 тыс. лет. Их сокращение было связано главным образом с повышенной инсоляцией в начале — середине голоцена, а более короткие наступания объясняются разными механизмами, в том числе процессами внутренних взаимодействий в климатической системе Земли. Современное отступление ледников, напротив, происходит в эпоху, которая по параметрам инсоляции скорее благоприятна для роста оледенения в Северном полушарии. Если отступление ледников будет происходить такими темпами, как сейчас, то уже в текущем столетии ледники станут меньше, чем они были в эпоху максимального голоценового потепления 8–6 тыс. л.н. [5], и исчезнут во многих горно-ледниковых районах мира.

Анализ радиоуглеродных датировок органических остатков, вытаявающих из-под ледников Канадской Арктики, показывает, что, возможно, в высоких широтах Северного полушария ледники ни разу не сокращались до современных размеров в последние 44 тыс. лет. Таким образом, современное потепление, которое привело к подобному сокращению, уникально в масштабе этого длительного периода [44]. Интересно, что сходные выводы сделаны по материалам изучения массива Монгун-Тайга, где макроостатки древесины, вытаявающие сейчас из-под ледников, имеют радиоуглеродный возраст более 58 тыс. лет (LU-3666) [1]. Очевидно, что для корректной интерпретации этих результатов необходимо учитывать неотектонические процессы и возможности загрязнения материала для датирования «старым» углеродом.

Заключение

В Северном полушарии на протяжении голоцена наблюдался заметный долгопериодный тренд к похолоданию, смещению на север зоны внутритропической конвергенции и ослаблению Индийского муссона, в Южном, напротив, тренд к потеплению [57].

Данные о поведении горных ледников подтверждают этот вывод: размеры ледников и масштабы их периодических наступаний в Северном полушарии в целом увеличивались от начала к концу голоцена, а в Южном полушарии — уменьшались. Этот тренд, вероятно, объясняется противоположным ходом инсоляции по причине орбитального сигнала (прецессия). Проследить влияние изменений солнечной активности на оледенение сложнее, так как механизм похолоданий, связанный с небольшими возмущениями солнечной активности в голоcene, пока ясен не до конца. Многие голоценовые наступания ледников совпадают с циклами Бонда (похолодания в Северной Атлантике) и с крупными, климатически эффективными вулканическими извержениями. Возможно, сочетание вулканических извержений как спускового механизма для сильных, но коротких похолоданий с периодами уменьшения солнечной активности и последующего увеличения площади морских льдов (увеличение альбедо) — основной механизм, приводящий к похолоданиям и наступаниям ледников в голоcene. Современные отступающие ледники свидетельствуют о глобальных процессах потепления, которые пока невозможно объяснить только естественными причинами.

Благодарности. Автор благодарит за помощь в оформлении этой работы Л.И. Лазукову.

Работа поддержана программами Президиума П4, ОНЗ 12 и грантом РФФИ 13-05-90306.

Литература

1. Ганюшкин Д.А. Современное и древнее оледенение горного массива Монгун-Тайга. СПб.: LAP, 2012. 278 с.
2. Назаров А.Н., Соломина О.Н., Мыглан В.С. Динамика верхней границы леса и ледников центрального и восточного Алтая в голоcene // ДАН. 2012. Т. 444. № 6. С. 671–675.
3. Abbott M.B., Wolfe B.B., Wolfe A.P., Seltzer G.O., Aravena R., Mark B.G., Polissar P.J., Rodbell D.T., Rowe H.D., Vuille M. Holocene paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment studies // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2003. V. 194. P. 123–138.
4. Alley R.B., Agustsdottir A.M. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change // *Quaternary Science Reviews*. 2005. V. 24. P. 1123–1149.
5. Anderson R.K., Miller G.H., Briner J.P., Lifton N.A., De Vogel S.B. A millennial perspective on Arctic warming from 14C in quartz and plants emerging beneath ice caps // *Geophys. Research Letters*. 2008. V. 35. № 1. L01502.
6. Antoniadou D., Francusa P., Pienitz R., St-Onge G., Vincent W.F. Holocene dynamics of the Arctic's largest ice // *Proc. of the National Academy of Sciences of United States of America*. 2011. V. 108. № 47. P. 18899–18904.
7. Bay R. C., Bramall N.E., Price P.B., Clow G.D., Hawley R.L., Udisti R., Castellano E. Globally synchronous ice core volcanic tracers and abrupt cooling during the last glacial period //

- Journ. of Geophys. Research: Atmospheres. 2006. V. 111. № D11. doi: 10.1029/2005JD006306
8. Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene // *Science*. 2001. V. 294. P. 2130–2135.
 9. Bowerman N.D., Clark D.H. Holocene glaciation of the central Sierra Nevada, California // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. № 9–10. P. 1067–1085.
 10. Briner J.P., Davis P.T., Miller G.H. Latest Pleistocene and Holocene glaciation of Baffin Island, Arctic Canada: key patterns and chronologies // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2075–2087.
 11. Broecker W.S., Kennett J.P., Flower B.P., Teller J.T., Trumbore S., Bonani G., Wöflfi W. Routing of meltwater from the Laurentide ice sheet during the Younger Dryas cold episode // *Nature*. 1989. V. 341. P. 318–321.
 12. Broecker W.S., Bond G., Klas M. A salt oscillator in the glacial North Atlantic? The concept // *Paleoceanography*. 1990. V. 5. P. 469–477.
 13. Clark P.U., Marshall S.J., Clarke G.K.C., Hostetler S.W., Licciardi J.M., Teller J.T. Freshwater forcing of abrupt climate change during the last glaciation // *Science*. 2001. V. 293. P. 283–287.
 14. Debret M., Bout-Roumazelles V., Grousset F., Desmet M., McManus J.F., Masei N.D., Sebag D., Petit J.-R., Copard Y., Trentesaux A. The origin of the 1500-year climate cycles in Holocene North-Atlantic records // *Climate of the Past*. 2007. V. 3. P. 569–575.
 15. Denton G.H., Karlen W. Lichenometry: its application to Holocene moraine studies in Southern Alaska and Swedish Lapland // *Arctic and Alpine Research*. 1973. V. 5. № 4. P. 347–372.
 16. Domack E., Duran D., Leventer A., Ishman S., Doane S., McCallum S., Amblas D., Ring J., Gilbert R., Prentice M. Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch // *Nature*. 2005. V. 436. № 4. P. 681–685.
 17. Ferris D.G., Cole-Dai J., Reyes A.R., Budner D.M. South Pole ice core record of explosive volcanic eruptions in the first and second millennia A.D. and evidence of a large eruption in the tropics around 535 A.D. // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2011. V. 116. № D17. doi: 10.1029/2011JD015916
 18. Geirsdóttir A., Miller G.H., Axford Y., Ólafsdóttir S. Holocene and latest Pleistocene climate and glacier fluctuations in Iceland // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2107–2118.
 19. Glasser N.F., Clemmens S., Schnabel C., Fenton C.R., McHargue L. Tropical glacier fluctuations in the Cordillera Blanca, Peru between 12.5 and 7.6 ka from cosmogenic ¹⁰Be dating // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 3448–3458.
 20. Goehring B.M., Vacco D.A., Alley R.B., Schaefer J.M. Holocene dynamics of the Rhone Glacier, Switzerland, deduced from ice flow models and cosmogenic nuclides // *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. V. 351–352. P. 27–35.
 21. Grove J.M. Little ice ages: ancient and modern. New York, Routledge, 2004. 402 p.
 22. Hall B.L., Denton G.H. Holocene history of the Wilson Piedmont Glacier along the southern Scott Coast, Antarctica // *The Holocene*. 2002. V. 12. № 5. P. 619–627.
 23. Hjort C., Bently M.J., Ingolfsson O. Holocene and pre-Holocene temporary disappearance of the George VI Ice Shelf, Antarctic Peninsula Antarctic // *Science*. 2001. V. 13. № 3. P. 296–301.
 24. Hodgson D.A. First synchronous retreat of ice shelves marks a new phase of polar deglaciation // *Proc. of the National Academy of Sciences of United States of America*. 2011. V. 108. № 47. P. 18859–18860.
 25. Holzhauser H., Magny M., Zumbuehl H.J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years // *The Holocene*. 2005. V. 15. P. 789–801.
 26. Hormes A., Muller B.U. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps // *The Holocene*. 2001. V. 11. № 3. P. 255–265.
 27. Ivy-Ochs S., Kerschner H., Maisch M., Christl M., Kubik P.W., Schluechter C. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2137–2149.
 28. Joerin U.E., Nicolussi K., Fischer A., Stocker T.F., Schluechter C. Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschier Glacier, Eastern Swiss Alps // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27. P. 337–350.
 29. Jomelli V., Khodri M., Favier V., Brunstein D., Ledru M.-P., Wagnon P., Blard P.-H., Sicart J.-E., Braucher R., Grancher D., Bourlès D., Braconnot P., Vuille M. Irregular tropical glacier retreat over the Holocene epoch driven by progressive warming // *Nature*. 2011. V. 474. P. 196–199.
 30. Kelly M.A., Lowell T.V. Fluctuations of local glaciers in Greenland during latest Pleistocene and Holocene time // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2088–2106.
 31. Kirkbride M.P., Dugmore A.J. Responses of mountain ice caps in central Iceland to Holocene climate change // *Quaternary Science Reviews*. 2006. V. 25. № 13–14. P. 1692–1707.
 32. Koch J., Clague J.J. Are insolation and sunspot activity the primary drivers of global Holocene glacier fluctuations? // *Pages Newsletter*. 2006. V. 14. № 3. P. 20–21.
 33. Larsen N.K., Kjær K.H., Olsen J., Funder S., Kjeldsen K.K., Nørgaard-Pedersen N. Restricted impact of Holocene climate variations on the southern Greenland Ice Sheet // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. № 21–22. P. 3171–3180.
 34. Larsen D.J., Miller G.H., Geirsdóttir A., Ólafsdóttir S. Non-linear Holocene climate evolution in the North Atlantic: a high-resolution, multi-proxy record of glacier activity and environmental change from Hvítárvatn, central Iceland // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 39. P. 14–25.
 35. Licciardi J.M., Schaefer J.M., Taggart J.R., Lund D.C. Holocene Glacier Fluctuations in the Peruvian Andes Indicate Northern Climate Linkages // *Science*. 2009. V. 325. P. 1677–1679. doi: 10.1126/science.1175010
 36. Luckman B.H., Wilson R.J.S. Summer temperature in the Canadian Rockies during the last millennium – a revised record // *Climate Dynamics*. 2005. V. 24. P. 131–144.
 37. Mann M.E., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F. Global signatures and dynamical origins of the «Little Ice Age» and «Medieval Climate Anomaly» // *Science*. 2009. V. 326. P. 1256–1260.
 38. Mark B.G., Seltzer G.O. Rates of deglaciation during the Last Glaciation and Holocene in the Cordillera Vilcanota-Quechcaya Ice Cap Region, Southeastern Peru // *Quaternary Research*. 2002. V. 57. № 3. P. 287–298.
 39. Matthews J.A., Dresser P.Q. Holocene glacier variation chronology of the Smørstabbtinden massif, Jotunheimen, southern Norway, and the recognition of century- to millennial-scale European Neoglacial events // *The Holocene*. 2008. V. 18. P. 181–201.
 40. Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karlén W., Masch K.A., Meeker L.D., Meyerson E.-A., Gasse F., van Kreveld S., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R., Steig E.J. Holocene climate variability // *Quaternary Research*. 2004. V. 62. P. 243–255.

41. Menounos B., Osborn G., Clague J., Luckman B. Latest Pleistocene and Holocene glacier fluctuations in western Canada // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. № 21–22. P. 2049–2074.
42. Miller G.H. Variations in lichen growth from direct measurements: preliminary curves for *Alectoria minuscula* from eastern Baffin Island, N. W. T., Canada // *Arctic and Alpine Research*. 1973. V. 5. P. 333–339.
43. Miller G.H., Wolfe A.P., Sauer P.E., Nesje A. Holocene glaciation and climate evolution of Baffin Island, Arctic Canada // *Quaternary Science Reviews*. 2005. V. 24. № 14–15. P. 1703–1721.
44. Miller G.H., Geirsdóttir A., Zhong Y., Larsen D.Y., Otto-Bliesner B.L., Holland M.M., Bailey D.A., Refsnider K.A., Lehman S.J., Southon J.R., Anderson C., Björnsson H., Thordarson T. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks // *Geophys. Research Letters*. 2012. V. 39. № 2. doi: 10.1029/2011GL050168
45. Nesje A. Latest Pleistocene and Holocene alpine glacier fluctuations in Scandinavia // *Quaternary Science Reviews*. 2009. V. 28. P. 2119–2136.
46. Nicolussi K., Patzelt G. Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria // *The Holocene*. 2000. V. 10. № 2. P. 191–199.
47. Nussbaumer S.U., Steinhilber F., Trachsel M., Breitenmoser P., Beer J., Blass A., Grosjean M., Hafner A., Holzhauser H.P., Wanner H., Zumbühl H.J. Alpine climate during the Holocene: a comparison between records of glaciers, lake sediments and solar activity // *Journ. of Quaternary Science*. 2011. V. 26. № 7. P. 703–713.
48. Porter S.C., Denton G.H. Chronology of Neoglaciation in the North American cordillera // *American Journ. of Science*. 1967. V. 265. P. 177–210.
49. Porter S.C. Onset of Neoglaciation in the Southern Hemisphere // *Journ. of Quaternary Science*. 2000. V. 15. № 4. P. 395–408.
50. Porter S.C. Neoglaciation in the American Cordilleras // *Encyclopedia of Quaternary Science* / Ed. S.A. Elias. 2007. P. 1133–1142.
51. Roethlisberger F., Geyh M.A. Glacier variations in Himalayas and Karakorum // *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeology*. 1985. V. 21. P. 237–249.
52. Schaefer J.M., Denton G.H., Kaplan M., Putnam A., Finkel R.C., Barrell D.J.A., Andersen B.G., Schwartz R., Mackintosh A., Chinn T., Schlüchter C. High-Frequency Holocene Glacier Fluctuations in New Zealand Differ from the Northern Signature // *Science*. 2009. V. 324. № 5927. P. 622–625. doi: 10.1126/science.1169312
53. Seong Y.B., Owen L.A., Yi C., Finkel R.C. Quaternary glaciation of Muztag Ata and Kongur Shan: evidence for glacier response to rapid climate changes throughout the Late-glacial and Holocene in westernmost Tibet // *Geological Society of America Bulletin*. 2009. V. 129. P. 348–365. doi: 10.1130/B26339.1
54. Solomina O., Haeblerli W., Kull C., Wiles G. Historical and Holocene glacier–climate variations: General concepts and overview // *Global and Planetary Change*. 2008. V. 60. P. 1–9.
55. Stotter J., Wastl M. Holocene palaeoclimatic reconstruction in northern Iceland: approaches and results // *Quaternary Science Reviews*. 1999. V. 18. № 3. P. 457–474.
56. Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T. Observations: Cryosphere // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. P. 317–381.
57. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M. Structure and origin of Holocene cold events // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. № 21–22. P. 3109–3123. doi: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010
58. Wiles G.C., Barclay D.J., Calkin P.E., Lowell T.V. Century to millennial-scale temperature variations for the last two thousand years indicated from glacial geologic records of Southern Alaska // *Global and Planetary Change*. 2008. V. 60. P. 115–125.
59. Winkler S., Matthews J.A. Holocene glacier chronologies: Are ‘high-resolution’ global and inter-hemispheric comparisons possible? // *The Holocene*. 2010. V. 20. № 7. P. 1137–1147. doi: 10.1177/0959683610369511
60. Young N.E., Briner J.P., Rood D.H., Finkel R.C., Corbett L.B., Bierman P.R. Age of the Fjord Stade moraines in the Disko Bugt region, western Greenland, and the 9.3 and 8.2 ka cooling events? // *Quaternary Science Reviews*. 2013. V. 60. P. 76–90.

Summary

The magnitude of glacier advances generally increased in the Northern Hemisphere and decreased in the Southern Hemisphere over the Holocene. This trend can be explained by the orbital forcings. The exceptions are in some regions of the high Asia. 10–4 ka BP and during the 1st Century CE to the early 13th century CE the glaciers were close by sizes to the modern ones or even smaller. The pattern is confirmed by the upper and Northern tree line advances in the Northern Hemisphere. The period with generally «small glaciers» (5–7 ka) coincides with the lack of the major volcanic eruptions, and with the low solar activity. The Early Holocene moraines cluster in seven groups (from 11.1 to 8.1 ka BP). They coincide with all Early Holocene Bond cycles (11.1, 10.3, 9.4, 8.1 ka) and all major volcanic eruptions (11.0, 9.5–9.7, 9.1–9.3, 8.0–8.1). Due to the coincidence of several eruptions with the Bond cycles (solar minima) it is difficult to distinguish between the solar and volcanic signals in the Early Holocene records. The coupling between the glacial and solar/volcanic forcings in the mid Holocene is less evident, but it becomes strong again in the last 2 ka (1.4 ka and LIA events). The modern glacier retreat disagrees with the actual orbital forcings and is due to both solar and anthropogenic influence. Glacier variations at the moment do not provide proofs for any cycles or global synchronism through the Holocene. However the lack of such evidences can be also explained by the limitations of these records (discontinuous, incomplete, of low accuracy, showing a mixture of advances triggered by both temperature and precipitation).