

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.32

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ БАЛАНСА МАССЫ
АРКТИЧЕСКИХ ЛЕДНИКОВ В XX СТОЛЕТИИ
НА ОСНОВЕ МАКРОЦИРКУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

В.М. Федоров

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119899, Москва, Ленинские горы, Россия, ipyf@mail.ru*

Для реконструкции динамики баланса массы ледников Арктики предложена макроциркуляционная модель, основанная на типизации атмосферных процессов Б.Л. Дзерdzeевского. Изменение во времени баланса массы ледников в основном определяется режимом массоэнергообмена в системе ледник–атмосфера. Режимы массоэнергообмена связаны с динамикой циркуляционных процессов в атмосфере, которая моделируется последовательным и закономерным чередованием циркуляционных сезонов и элементарных циркуляционных механизмов. В работе определялась связь элементарных циркуляционных механизмов с динамикой показателей баланса массы. Для исследования связи разработана методика определения пропорционального вклада данного циркуляционного механизма в отклонение от средних многолетних значений показателей баланса массы ледников. В результате применения этой методики получена серия гляциологических реконструкций динамики баланса массы ледников Энгабреен (Норвегия), Стурглясьерен (Швеция), Ловен Средний (Шпицберген, Норвегия), Брёггер Восточный (Шпицберген), Вёринг (Шпицберген), ИГАН (Полярный Урал, Россия), Девон (Канадский архипелаг) в XX столетии.

Арктические ледники, баланс массы, атмосферная циркуляция, реконструкция

**RECONSTRUCTION OF THE DYNAMICS OF MASS BALANCE OF THE ARCTIC GLACIERS
IN THE XX CENTURY ON THE BASIS OF THE MACROCIRCULATION MODEL**

V.M. Fedorov

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
119899, Moscow, Leninskie Gory, Russia, ipyf@mail.ru*

The macrocirculation model has been proposed for reconstruction of the dynamics of the mass balance of Arctic glaciers. It is based on the typification of atmospheric processes by B.L. Dzerdzeevsky. Variation of the glacier mass balance with time is determined mainly by the conditions of energy and mass exchange in the glacier-atmosphere system. In many respects mass and energy exchange regime is coupled with the dynamics of elementary circulation mechanisms in atmosphere, which is simulated by the successive and regular alternation of circulation seasons and circulation mechanisms. In the paper, the association of energy and mass exchange regimes (corresponding to different types of elementary circulation mechanisms) and mass balance dynamics has been investigated. In order to reveal this relationship, the method of determination of proportional contribution of elementary circulation mechanism to mass balance deviation from average annual value has been worked out. As a result of application of the proportional elementary circulation mechanisms contribution method, a series of glaciological reconstructions of the dynamics of the mass balance have been obtained for a number of glaciers: Engabreen (Norway), Sturglacieren (Sweden), Midre Lovenbreen (Svalbard), Austre Broggebreen (Svalbard), Voringbreen (Svalbard), IGAN (The Polar Ural, Russia), Devon Ice Cap (Canadian Archipelago) in the XX century.

Arctic glaciers, mass balance, atmospheric circulation, reconstruction

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция динамики баланса массы ледников позволяет существенно расширить хронологический диапазон балансовых данных, что соз-

дает основу для получения новой информации об особенностях развития ледников и определяющем их эволюцию характере изменения климатических

условий. Кроме того, увеличение продолжительности временных рядов балансовых показателей создает дополнительную базу для реализации схем вероятностного, статистического и других методов прогноза как динамики ледников, так и климатических изменений.

Развитие ледников определяется климатическими условиями, важнейшими из которых являются макроциркуляционные процессы в атмосфере. Эти процессы определяют особенности массо- и энергообмена ледника с атмосферой и, следовательно, динамику баланса массы ледников [Бут, 1963; Кренке, 1963; Егорова, 1964; Ходос, 1966; Маркин, 1972; Корякин, 1988; Федоров, 2006, 2007].

Динамика макроциркуляционных процессов в атмосфере моделируется последовательным и закономерным чередованием циркуляционных сезонов и элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) в типизации Б.Л. Дзердзеевского. ЭЦМ – типовой циркуляционный процесс, в течение которого в Северном полушарии сохраняется географическое положение циклонических и антициклонических областей и направление их перемещения [Дзердзеевский, 1968, 1975; Савина, Хмелевская, 1984; Циркуляционные..., 1987]. Каждый ЭЦМ представлен динамической схемой, отражающей синоптическое положение в любом регионе внетропических широт. С режимами температур и осадков, соответствующими отдельным типам ЭЦМ, связана изменчивость показателей баланса массы ледников [Маркин, 1972; Ананичева, Кононова, 2007]. Смена одного ЭЦМ другим фиксируется по ежедневным синоптическим картам в Календаре последовательной смены ЭЦМ, который ведется в Институте географии РАН (www.atmospheric-circulation.ru). В Календаре приводятся данные о суточном распределении ЭЦМ с 1899 г. по настоящее время. Этот Календарь, наряду с данными по динамике баланса массы арктических ледников, является информационной основой предлагаемой методики реконструкции динамики баланса массы ледника.

Ранее модель такой реконструкции была разработана автором для ледников Норвегии [Федоров, 2006, 2007]. В ее основе – определение пропорции циркуляционного вклада каждого типа ЭЦМ в отклонение годовых значений балансовых показателей ледника от их среднего многолетнего значения. В настоящей статье с применением данной методики рассматриваются арктические ледники Энгабреен (Норвегия), Стурглясьерен (Швеция), Ловен Средний (Шпицберген, Норвегия), Брёггер Восточный (Шпицберген), Вёринг (Шпицберген), ИГАН (Полярный Урал, Россия), Девон (Канадский архипелаг) (рис. 1).

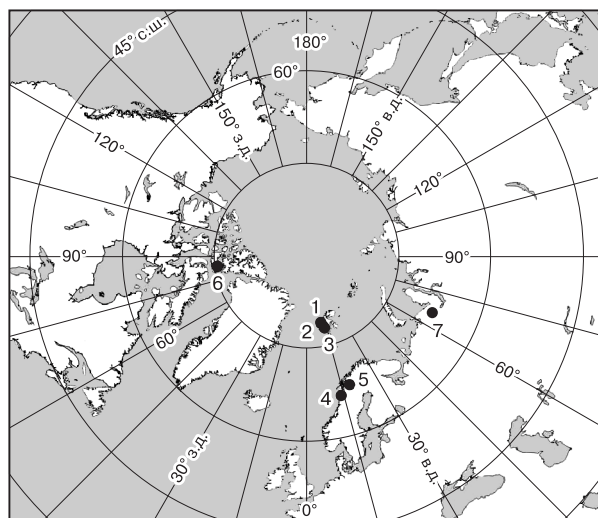


Рис. 1. Схема расположения исследуемых ледников:

1 – Брёггер Восточный, 2 – Ловен Средний, 3 – Вёринг, 4 – Энгабреен, 5 – Стурглясьерен, 6 – Девон, 7 – ИГАН.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для имеющихся рядов инструментальных наблюдений за аккумуляцией и абляцией [Fluctuation..., 1967, 1973, 1977, 1985, 1988, 1993, 1998; Mass..., 1996; <http://www.geo.unizh.ch>] рассчитывались отклонения от средних многолетних значений. В результате были получены знакопеременные функции, отражающие колебания балансовых показателей относительно нормы. Для рассчитанных рядов по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ [Дзердзеевский, 1975; Кононова, 2003; www.atmospheric-circulation.ru] определялась продолжительность каждого типа ЭЦМ (в сутках) отдельно для лет с положительными и отрицательными отклонениями от среднего многолетнего (для аккумуляции и абляции) за определенные интервалы циркуляционных сезонов или календарные периоды. При этом начало и продолжительность периодов аккумуляции и абляции определялись эмпирически с помощью оптимальных величин оценочных параметров (максимальное значение коэффициента корреляции и минимальное значение расхождения рядов). Далее для каждого балансового показателя рассчитывалась среднегодовая продолжительность (в сутках) отдельных типов ЭЦМ для лет с положительными и отрицательными отклонениями. С учетом того, что связанные с отдельными типами ЭЦМ термические режимы и режимы осадков вносят определенный циркуляционный вклад в формирование как положительных, так и отрицательных аномалий годовых значений балансовых показателей ледника, рассчитаны пропорции вклада каждого

Таблица 1. Вклад элементарного циркуляционного механизма (ЭЦМ) в формирование аномалий аккумуляции и абляции ледника ИГАН

Тип ЭЦМ, по Б.Л. Дзердзевскому [1975]	Вклад ЭЦМ (д.е.) в формирование аномалии			
	аккумуляции		абляции	
	>0	<0	>0	<0
1а	0,474	0,526	0,000	1,000
1б	0,545	0,455	0,000	0,000
2а	0,000	0,000	0,346	0,654
2б	0,000	0,000	0,636	0,364
2в	0,000	0,000	0,286	0,714
3	0,727	0,273	0,533	0,467
4а	0,000	0,000	1,000	0,000
4б	0,000	0,000	0,400	0,600
4в	0,000	1,000	0,533	0,467
5а	0,564	0,436	0,000	0,000
5б	0,706	0,294	0,000	0,000
5в	0,765	0,235	0,000	0,000
5г	0,615	0,385	0,000	0,000
6	1,000	0,000	1,000	0,000
7аз	0,467	0,533	0,000	0,000
7ал	0,000	0,000	0,438	0,562
7бз	0,414	0,586	0,000	0,000
7бл	0,000	0,000	0,111	0,889
8а	0,684	0,316	0,250	0,750
8бз	0,581	0,419	0,000	0,000
8бл	0,000	0,000	0,250	0,750
8вз	0,500	0,500	0,000	0,000
8вл	0,000	0,000	0,619	0,381
8гз	0,111	0,889	0,000	0,000
8гл	0,000	0,000	0,000	0,000
9а	1,000	0,000	0,737	0,263
9б	0,783	0,217	0,000	0,000
10а	0,412	0,588	0,714	0,286
10б	1,000	0,000	0,857	0,143
11а	0,417	0,583	0,000	0,000
11б	0,519	0,481	0,000	1,000
11в	0,304	0,696	0,000	0,000
11г	0,600	0,400	0,000	0,000
12а	0,522	0,478	0,105	0,895
12бз	0,376	0,624	0,000	0,000
12бл	0,000	0,000	0,519	0,481
12вз	0,500	0,500	0,000	0,000
12вл	0,000	0,000	0,214	0,786
12г	0,547	0,453	0,667	0,333
13з	0,553	0,447	0,000	0,000
13л	0,000	0,000	0,583	0,417
ВТ	0,000	0,000	0,000	0,000

ЭЦМ в процессы формирования аккумуляции и абляции. Полученные пропорции являются “ключом” для реконструкции значений аккумуляции, абляции и баланса массы ледника. В табл. 1 приведены “ключи” для аккумуляции и абляции ледника ИГАН (Полярный Урал).

В качестве верификации “ключей” по полученным пропорциям вклада реконструировались ряды балансовых показателей за период инструментальных наблюдений. Для этого по Календарю последовательной смены ЭЦМ определялась продолжительность каждого ЭЦМ за расчетный период. Затем на основе “ключа” определялся циркуляционный вклад каждого ЭЦМ за расчетный период в отклонение от среднего многолетнего значения аккумуляции и абляции. С учетом предположения, что суммарная по модулю (за анализируемый период) аномалия вкладов ЭЦМ соответствует суммарной по модулю аномалии балансового показателя, рассчитаны коэффициенты пропорциональности между ними. Умножением значений годовых отклонений ЭЦМ на коэффициент пропорциональности получены реконструированные на основе пропорции вклада (“ключа”) значения годовых отклонений балансовых показателей от среднего многолетнего, а также величины аккумуляции, абляции и баланса массы. В качестве примера на рис. 2, 3 графически представлены инструментальные и реконструированные (за период инструментальных наблюдений) ряды балансовых показателей для ледников Энгабреен и Девон. Результаты оценки “ключей” по анализируемым ледникам представлены в табл. 2.

В качестве оценочных характеристик в табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции исходных и реконструированных рядов, среднее расхождение между рядами в миллиметрах водного эквивалента (мм в.э.) (слое воды в миллиметрах эквивалентного массе льда) и в процентах от модуля среднего многолетнего значения аномалии для исходного ряда (для аккумуляции и абляции). Из табл. 2 следует, что при высоких значениях коэффициента корреляции ($K_{\text{корр}}$) средние многолетние разности значений исходного и реконструированного рядов всегда меньше (по модулю) средних многолетних аномалий аккумуляции или абляции. Это свидетельствует о существенном приближении реконструированных рядов к измеренным. Кроме того, значения расхождений, учитывая определенные ограничения и погрешности разрабатываемой модели, не слишком велики.

Эти результаты согласуются с данными, полученными при исследовании корреляционной связи индексов североатлантической осцилляции (NAO) с балансом массы альпийских и скандинавских ледников [Воскресенская, Ананичева, 2006]. Полученные в обоих случаях высокие значения коэффициента корреляции циркуляционных характеристик (индексов NAO и ЭЦМ) с динамикой баланса массы ледников отражают тесную связь баланса массы ледников с циркуляционными процессами в атмосфере.

В результате верификации определены достаточно высокая степень корреляционной связан-

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ БАЛАНСА МАССЫ АРКТИЧЕСКИХ ЛЕДНИКОВ В XX СТОЛЕТИИ

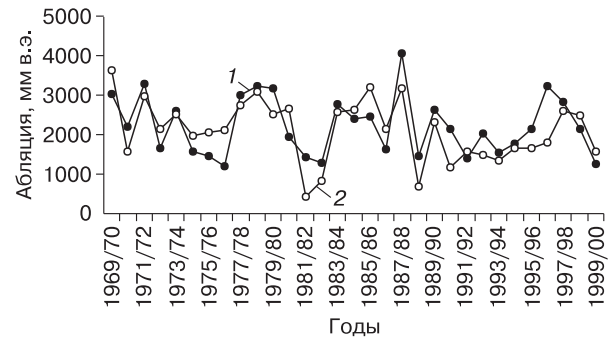
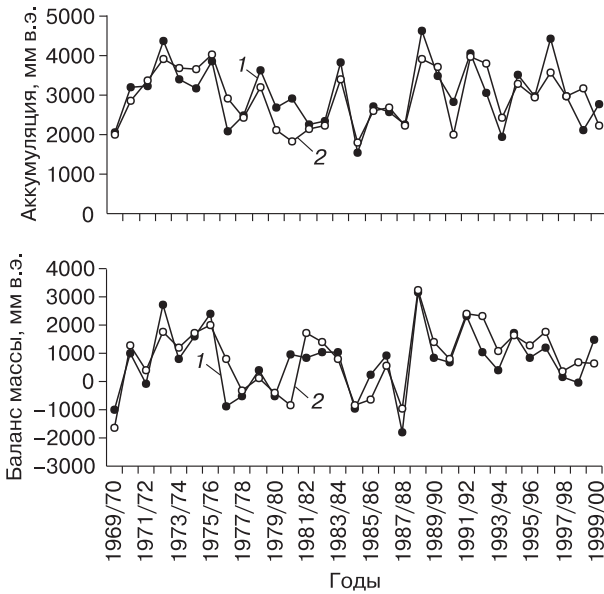


Рис. 2. Динамика балансовых показателей ледника Энгабреен (Норвегия) с 1969/70 по 1999/2000 гг.

1 – инструментальные ряды; 2 – реконструированные ряды.

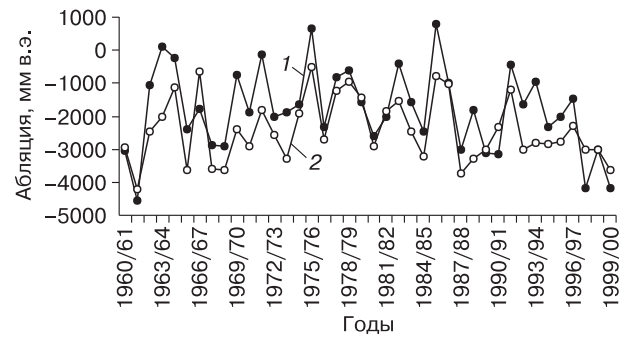
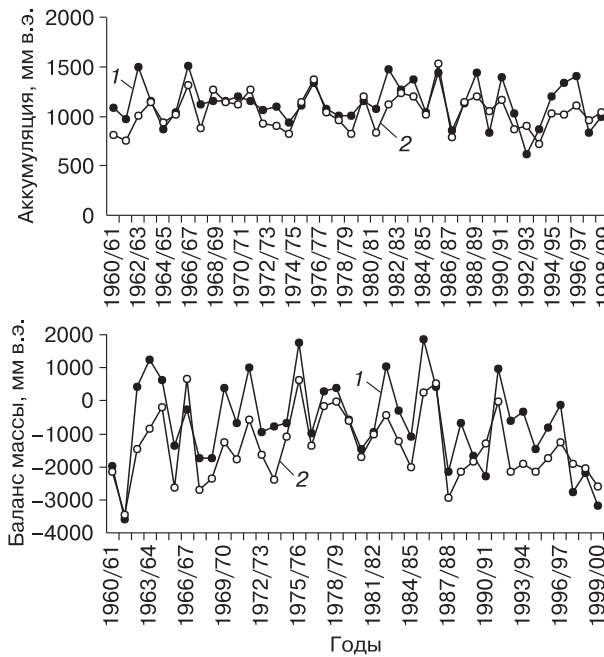


Рис. 3. Динамика балансовых показателей ледника Девон (Канада) с 1960/61 по 1999/2000 гг.

1 – инструментальные ряды; 2 – реконструированные ряды.

Таблица 2. Оценочные характеристики связи инструментальных исходных и реконструированных рядов балансовых показателей для ледников Арктики

Ледник	Аккумуляция			$K_{корр}$	Абляция		$K_{корр}$	Баланс массы			
	$K_{корр}$	Расхождение			$K_{корр}$	Расхождение		$K_{корр}$	Расхождение		
		мм в.э.	%			мм в.э.			%	мм в.э.	%
Энгабреен	0,782	385	61,4	0,702	505	79,9	0,808	536	63,2		
Стурглясьерен	0,687	236	74,1	0,668	329	85,1	0,761	384	67,8		
Ловен Средний	0,751	95	68,9	0,726	172	72,0	0,855	184	77,0		
Брёггер Восточный	0,622	93	79,5	0,754	171	69,6	0,812	145	56,9		
Вёринг	0,719	102	74,2	0,774	186	65,3	0,740	231	81,6		
ИГАН	0,754	396	68,5	0,815	343	51,4	0,738	479	76,2		
Девон	0,650	148	91,6	0,776	836	84,5	0,794	887	87,0		
Среднее	0,709	208	74,0	0,745	363	72,5	0,787	407	72,1		

ности и приближения значений рядов, что стало основанием для реконструкции по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ (с использованием “ключей”) балансовых показателей и баланса массы некоторых арктических ледников с 1900/01 балансового года до начала инструментальных наблюдений на каждом из них.

Следует отметить, что модель имеет определенные ограничения и погрешности.

1. При создании “ключа” в модели не учитываются величины аномалий. Пропорция циркуляционного вклада (“ключ”) рассчитывается только на основе знака аномалии.

2. При использовании “календарной” модели реконструкции применяются постоянные для каждого года периоды аккумуляции и абляции, хотя реально сроки аккумуляции и абляции меняются от года к году. Для “сезонной” модели периоды аккумуляции и абляции связаны с переменными год от года датами начала и окончания циркуляционных сезонов. Используемые в моделях периоды аккумуляции и абляции принимаются по модели, имеющей оптимальные оценочные критерии (коэффициент корреляции, степень приближения графиков).

3. Принимается, что при изменении порядка наступления, начала и продолжительности отдельных типов ЭЦМ в общем циркуляционном процессе вклад каждого ЭЦМ в отклонение параметра (аккумуляции, абляции) от среднего многолетнего на протяжении периода реконструкции для конкретного ледника не меняется.

4. Допускается, что отклонения от среднего многолетнего балансовых показателей определяются полностью циркуляционными факторами и на основе линейной зависимости.

5. В тестируемом периоде должны встречаться все ЭЦМ для определения их вклада (создания

“ключа”), иначе при реконструкции возможно появление “белых пятен”.

6. Неизбежные ошибки модели связаны с пробелами в Календаре последовательной смены ЭЦМ (отсутствие данных за периоды с 10 по 31 декабря 1943 г. и с 7 по 10 марта 1946 г.).

7. Возможные расхождения модели с реальностью определяются также вариациями отдельных типов и подтипов ЭЦМ в пределах своей генерализованной схемы (инварианта). Так, расположение центров и траектории движений основных барических образований, их характеристики могут несколько различаться при повторении одного и того же подтипа. То есть ЭЦМ повторяется не абсолютно точно (как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали). Поэтому погодные (синоптические) условия могут различаться для одних и тех же районов при повторении типов и подтипов ЭЦМ.

8. Расхождения могут определяться вариациями, заложенными в типизации для отдельных подтипов ЭЦМ (нечеткостью в формализации ЭЦМ, например, типы 2б, 6, 7аз). Для определения расхождений модели на этапе проверки пропорции вклада используются оценочные характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определенная в результате верификации достаточно высокая степень корреляционной связи значений рядов стала основанием для реконструкции по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ (с использованием “ключей”) балансовых показателей семи арктических ледников с 1900/01 балансового года до начала инструментальных наблюдений.

На рис. 4 представлены кумулятивные кривые баланса массы рассматриваемых ледников. Среднегодовые значения балансовых показателей и суммарные балансы массы арктических ледников, рассчитанные за весь период, включая инструментальные наблюдения и реконструкцию с начала XX в., приведены в табл. 3. Анализ полученных данных показывает, что на протяжении прошлого столетия только один из ледников – Энгабреен (Северная Норвегия) характеризовался положительным суммарным балансом. В целом за XX столетие увеличение массы этого ледника составило 31,4 м в.э. На фоне общей тенденции к увеличению его массы (при среднегодовом значении 314 мм в.э.) отмечаются два хронологических рубежа (1970 и 1988 гг.), отражающих этапы (“скачки”) в увеличении баланса массы. Так, с 1901 по 1969 г. годовой баланс массы составлял 132 мм в.э. В период 1970–1987 гг. масса ледника в среднем за год увеличивалась на 566 мм в.э. (увеличение в 4,3 раза), а в период 1988–2000 гг. – на 934 мм в.э. (увеличение в 7,1 раза). Остальные

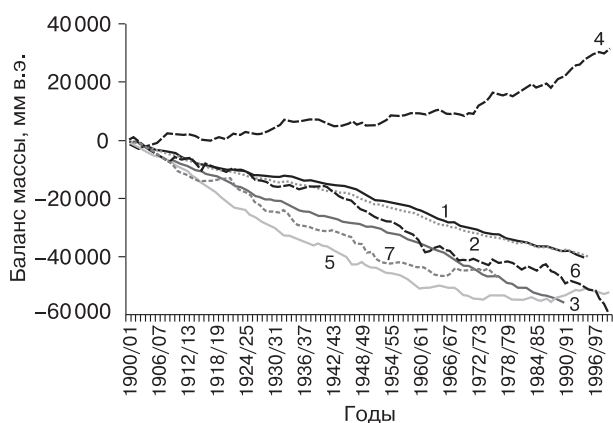


Рис. 4. Кумулятивные кривые баланса массы ледников:

1 – Брётгер Восточный, 2 – Ловен Средний, 3 – Вёринг, 4 – Энгабреен, 5 – Стурглясьерен, 6 – Девон, 7 – ИГАН.

Таблица 3. Средние многолетние значения балансовых показателей и суммарный баланс арктических ледников в XX столетии

Ледник	Средние многолетние значения, мм в.э.			Суммарный баланс, мм в.э.	Периоды	
	Аккумуляция	Абляция	Баланс массы		реконструкций	наблюдений
Брёггер Восточный	781,34	-1201,00	-422,51	-40 138	1966/67–1994/95	1900/01–1965/66
Ловен Средний	747,65	-1167,74	-420,09	-40 329	1968/69–1995/96	1900/01–1967/67
Вёринг	610,52	-1223,80	-614,77	-55 944	1974/75–1991/92	1900/01–1973/74
Энгабреен	2812,80	-2477,04	314,26	31 426	1969/70–1999/00	1900/01–1968/69
Стурглясьерен	1270,41	-1792,40	-521,99	-52 199	1945/46–1999/00	1900/01–1944/45
Девон	1092,71	-1691,70	-598,99	-59 899	1960/61–1999/00	1900/01–1959/60
ИГАН	2050,26	-2659,92	-609,66	-46 944	1957/58–1976/77	1900/01–1956/57
<i>Среднее</i>	1337,96	-1744,80	-410,54	-37 718		

шесть ледников сокращались. Среднегодовые значения для них за весь период составляли: 1092 мм в.э. для аккумуляции, 1623 мм в.э. для абляции и -531 мм в.э. для баланса массы, а суммарный баланс составил -49,2 м в.э.

Для ледника Стурглясьерен отмечаются те же характерные хронологические рубежи, что и для ледника Энгабреен. Так, с 1901 по 1969 г. среднее многолетнее значение баланса массы составляло -749 мм в.э. В период 1969–1987 гг. ледник находился в квазистационарном состоянии со средним многолетним значением -153 мм в.э. С 1988 по 2000 г. происходило увеличение годового баланса массы ледника, в результате чего в среднем за этот период он достигал 172 мм в.э., что на 325 мм в.э. больше, чем в предыдущем периоде. Эти рубежи отражают существенные изменения циркуляционных процессов в районе Скандинавского п-ова (Северо-Атлантическом регионе). Так, с 1970 г. отмечается усиление зональной циркуляции на полушарии, переходящей в 1980-е гг. в рост южной меридиональной циркуляции. В Северо-Атлантическом регионе и то и другое проявляется в усилении западного переноса с повышением температуры и осадков [Кононова, 2007]. С увеличением количества осадков в этом регионе связаны положительные тенденции в динамике баланса массы ледников.

Для анализируемых ледников Шпицбергена характерно постоянное сокращение их массы. Суммарное сокращение для расположенных рядом ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний составляют соответственно 40,1 и 40,3 м в.э. (за периоды, указанные в табл. 3). Для расположенного юго-западнее ледника Вёринг сокращение массы значительно и равно 55,9 м в.э. В динамике баланса массы ледников Брёггер Восточный и Ловен Средний в XX в. отмечается только 7 лет с положительным балансом массы. Синхронные годы с положительным балансом для этих ледников - 1933, 1934, 1943, 1987, 1991. Для ледника Вёринг положительный баланс массы отмечается в 1932 г.

Небольшой период в первой половине 1930-х гг. выделяется как наиболее благоприятный для развития исследуемых ледников. Сокращение ледников Шпицбергена с начала XX в. отмечается в работах О.П. Чинова [1976], В.С. Корякина [1988] и других исследователей.

Потеря массы карово-долинного ледника ИГАН, расположенного в Полярном Урале, за период 1901–1977 гг. составила 46,9 м в.э. На фоне общей тенденции к сокращению массы ледника (в среднем на 610 мм в.э. ежегодно) отмечаются два периода стационарного развития (1917–1922 и 1968–1975 гг.). Среднегодовые значения баланса массы для этих периодов составляют 202 и -3 мм в.э. соответственно. Деградация оледенения на Полярном Урале в XX в. не подвергается сомнению [Троицкий, 1963; Ходаков, 1963; Чинов, 1976]. Однако количественные данные, отражающие деградацию ледников Полярного Урала, несколько различаются. Так, по наблюдениям на удаленных метеостанциях (Воркута, Сыктывкар) и по установленной за период одновременных наблюдений (13 лет) связи между средними сезонными значениями температуры воздуха на станции Большая Ходата и соответствующей температурой на указанных станциях В.Г. Ходаковым [1963] было рассчитано снегонакопление и стаивание на леднике ИГАН за период 1820–1962 гг. По этим данным [Ходаков, 1963; Чинов 1976], в исследуемый нами период (1901–1977 гг.) преобладали годы с отрицательным балансом, однако в 1920-х гг. отмечался положительный баланс. Интервал с положительным балансом отмечается в макроциркуляционной реконструкции с 1917 по 1922 г. Эти несущественные расхождения могут определяться различной продолжительностью базовых рядов реконструкции: 13 лет в расчетах В.Г. Ходакова и 20 лет в макроциркуляционной модели. Постоянное сокращение массы ледника с конца 1920-х гг. следует из реконструкции, основанной на данных дендрохронологического анализа [Адаменко, 1963]. По фактически наблю-

Таблица 4. Значения коэффициентов корреляции аккумуляции ($K_{акк}$) и абляции ($K_{аб}$) с балансом массы ледников

Ледник	$K_{акк}$	$K_{аб}$
Брёггер Восточный	0,501	0,848
Ловен Средний	0,388	0,861
Вёринг	0,232	0,913
Энгабреен	0,690	0,737
Стурглясьерен	0,747	0,853
Девон	0,147	0,985
ИГАН	0,545	0,803
Среднее	0,464	0,857

даемым (1963 г.) превышениям морены над поверхностью языковой части ледника опускание поверхности ледника с начала столетия определяется приблизительно в 40 м [Ходаков, 1963]. По результатам макроциркуляционной модели эта величина в 1963 г. составляла 45,4 м в.э., что хорошо согласуется с фактически наблюдаемыми данными. Полученные нами характеристики балансовой динамики существенно отличаются от результатов реконструкции Ю.М. Кононова и М.Д. Ананичевой [2006]. По данным этих авторов кумулятивный баланс с начала столетия к 1952 г. составил 0,84 м, по данным макроциркуляционной реконструкции – 40,8 м. Отмечается также существенное отличие выполненной ранее В.Г. Ходаковым реконструкции от реконструкции Ю.М. Кононова и М.Д. Ананичевой [Ходаков, 1978; Кононов, Ананичева, 2006].

В динамике баланса массы ледника Девон (северо-западная часть ледниковой шапки), расположенного в Канадской Арктике (о. Девон), на фоне общего сокращения отмечаются периоды, отражающие существенные изменения в темпах сокращения массы. Так, в периоды 1901–1941 и 1963–1978 гг. в среднем масса ледника ежегодно сокращалась на 385 и 179 мм в.э. соответственно. В периоды 1942–1962 и 1979–2000 гг. ежегодное сокращение в среднем составляло 1081 и 874 мм в.э. соответственно. Таким образом, в указанные интервалы времени темпы сокращения массы изменялись значительно. В 1972 г. на леднике выполнено глубокое бурение, по результатам которого наименее благоприятные условия для развития ледниковой шапки о. Девон отмечаются с конца 1930-х до конца 1950-х гг., а наиболее благоприятные приходятся на середину 1930-х гг. [Корякин, 1988]. В соответствии с реконструкцией в период 1942–1962 гг. отмечается только один год (1955) с небольшим (47 мм в.э.) положительным балансом массы, а в период 1932–1941 гг. семь лет из десяти характеризуются положительным балансом массы. Следовательно, полученные по модели реконструкции данные хорошо согласуются с результатами проведенных ранее на леднике гляциологических исследований.

Анализ корреляции аккумуляции и абляции с балансом массы ледников за столетие показывает, что баланс массы определяется в основном колебаниями абляции (табл. 4). Для сокращающихся ледников это проявляется еще контрастнее (средние значения коэффициента корреляции равны 0,427 для аккумуляции и 0,877 для абляции). Только для двух скандинавских ледников отмечается примерно равный вклад обеих составляющих в изменчивость баланса массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика реконструкции динамики баланса массы арктических ледников в XX столетии на основе определения вклада атмосферной циркуляции в их аккумуляцию и абляцию.

2. Выполнены гляциологические реконструкции баланса массы для семи арктических ледников с 1900/01 балансового года до начала инструментальных наблюдений, что позволило значительно увеличить продолжительность рядов балансовых показателей для всех исследованных ледников (см. табл. 3). Таким образом, подготовлена основа для вероятностного, статистического и других прогнозов.

3. Анализ реконструкций показывает, что в арктическом поясе ледники в течение XX в. сокращаются (Стурглясьерен, Брёггер Восточный, Ловен Средний, Вёринг, ИГАН, Девон). Это отражает процесс увеличения летних (до 1 °С) и зимних температур в Арктике (на 3–5 °С) в XX в. [Режим..., 1992], что при небольшом количестве осадков является основным фактором деградации оледенения. Исключение представляет ледник Энгабреен, расположенный на западном побережье Скандинавского п-ова в зоне интенсивного юго-западного переноса влажных воздушных масс с Атлантики. Увеличение баланса массы в этом случае происходит за счет роста аккумуляции.

4. В динамике баланса массы арктических ледников Скандинавского региона отмечаются два характерных рубежа (1970 и 1988 гг.), отражающие этапы перестройки циркуляционных процессов. Так, с 1970 г. для ледника Энгабреен отмечается увеличение массы, для Стурглясьерен – стабилизация с отрицательным балансом, а с 1988 г. наблюдается существенный рост темпов накопления массы льда на обоих ледниках.

5. Анализ корреляции аккумуляции и абляции с балансом массы за столетие показывает, что баланс массы арктических ледников определяется в основном абляцией, что характерно для сокращающихся ледников.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-05-00939).

Литература

- Адаменко В.Н.** Опыт изучения условий существования ледников Полярного Урала за 260-летний период по данным дендрохронологического анализа // Гляциол. исслед., 1963, № 9, с. 103–118.
- Ананичева М.Д., Кононова Н.К.** Сравнительная характеристика связи температуры воздуха, осадков и баланса ледников с макроциркуляционными процессами на северо-востоке Сибири и на Полярном Урале // Материалы гляциол. исслед., 2007, вып. 103, с. 58–67.
- Бут И.В.** О соответствии между общей циркуляцией атмосферы и современным распределением ледников в Северном полушарии // Материалы гляциол. исслед., 1963, № 7, с. 57–65.
- Воскресенская Е.Н., Ананичева М.Д.** Связь изменчивости баланса массы ледников Европейского региона с глобальными климатическими процессами // Материалы гляциол. исслед., 2006, № 101, с. 106–110.
- Дзержевский Б.Л.** Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований. М., Ин-т географии; Междувед. геофиз. комитет, 1968, 240 с.
- Дзержевский Б.Л.** Общая циркуляция атмосферы и климат (избр. тр.). М., Наука, 1975, 288 с.
- Егоров Н.Д.** Циркуляция атмосферы и режим малоалмагинских ледников в 1957–1959 гг. // Материалы гляциол. исслед., 1964, вып. 9, с. 87–92.
- Кононов Ю.М., Ананичева М.Д.** Реконструкция баланса массы ледников Полярного Урала в XX в. // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М., Наука, 2006, с. 134–137.
- Кононова Н.К.** Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // Материалы гляциол. исслед., 2003, вып. 95, с. 45–65.
- Кононова Н.К.** Стихийные бедствия на Северном полушарии и в России в XX–XXI веках и их связь с макроциркуляционными процессами // Проблемы анализа риска. Гидрометеобезопасность, 2007, т. 4, № 1, с. 49–72.
- Корякин В.С.** Ледники Арктики. М., Наука, 1988, 160 с.
- Кренке А.Н.** Районирование ледников Арктики в связи с циркуляцией атмосферы // Материалы гляциол. исслед., 1963, вып. 8, с. 109–113.
- Маркин В.А.** Элементарные циркуляционные механизмы и внешний массообмен на поверхности ледников // Материалы гляциол. исслед., 1972, вып. 20, с. 116–124.
- Режим** и эволюция полярных ледниковых покровов / Ред. В.М. Котляков. СПб., Гидрометеиздат, 1992, 232 с.
- Савина С.С., Хмелевская Л.В.** Динамика атмосферных процессов Северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований (циркуляция атмосферы). М., Изд. АН СССР, 1984, № 9, 142 с.
- Троицкий Л.С.** О современной динамике ледников Полярного Урала // Гляциол. исслед., 1963, № 9, с. 26–41.
- Федоров В.М.** Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 100, с. 73–79.
- Федоров В.М.** Реконструкция динамики баланса массы субарктических ледников в XX столетии (на примере ледника Энгабreen) // Изв. РАН. Сер. геогр., 2007, № 3, с. 18–26.
- Ходаков В.Г.** Вещественный баланс ледников Полярного Урала // Материалы гляциол. исслед., 1963, вып. 8, с. 41–50.
- Ходаков В.Г.** Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М., Наука, 1978, 194 с.
- Ходос Э.Н.** К вопросу о влиянии различных условий циркуляции атмосферы на колебания ледников Большого Кавказа // Материалы гляциол. исслед., 1966, вып. 12, с. 164–170.
- Циркуляционные механизмы современных колебаний климата** / Ред. К.В. Кувшинова. М., Наука, 1987, 192 с.
- Чижов О.П.** Оледенение северной полярной области. М., Наука, 1976, 240 с.
- Fluctuations of Glaciers 1959–1965 (vol. I).** UNESCO. Paris, 1967, 260 p.
- Fluctuations of Glaciers 1965–1970 (vol. II).** UNESCO. Paris, 1973, 357 p.
- Fluctuations of Glaciers 1970–1975 (vol. III).** UNESCO. Paris, 1977, 269 p.
- Fluctuations of Glaciers 1975–1980 (vol. IV).** UNESCO. Paris, 1985, 265 p.
- Fluctuations of Glaciers 1980–1985 (vol. V).** UNESCO. Paris, 1988, 290 p.
- Fluctuations of Glaciers 1985–1990 (vol. VI).** IANS–UNEP–UNESCO. Zurich, 1993, 322 p.
- Fluctuations of Glaciers 1990–1995 (vol. VII).** IANS (ICSI)–UNEP–UNESCO. Zurich, 1998, 296 p.
- Mass balance of arctic glaciers.** Sosnowiec; Oslo, 1996, 62 p. (Rep. / IASC; No. 5).

Поступила в редакцию
18 ноября 2008 г.