

УДК 551.33



## РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ БАЛАНСА МАССЫ СУБАРКТИЧЕСКИХ ЛЕДНИКОВ В XX СТОЛЕТИИ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА ЭНГАБРЕЕН)<sup>1</sup>

© 2007 г. В. М. Федоров

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 26.04.2005 г.

Для реконструкции баланса массы субарктических ледников предложена статистическая макроциркуляционная модель, основанная на соотношениях среднегодовой продолжительности циркуляционных процессов в годы отрицательных и положительных отклонений показателей баланса массы ледника от среднего многолетнего значения в соответствующие циркуляционные сезоны. Применение модели позволило реконструировать показатели баланса массы ледника Энгабреен за период с 1900 по 1969 г., определить эпохи с различными тенденциями в динамике баланса массы и рассчитать их характеристики. На основании реконструированных рядов возможен вероятностный прогноз знака и величины отклонения значений показателей баланса массы для очередного года.

Ледники – элементы климатической системы. Изменение во времени баланса массы ледников в основном определяется сочетанием режимов осадкообразования и термического, связанных с динамикой циркуляционных процессов в атмосфере [5, 6, 8, 9, 12]. Такая динамика моделируется последовательным и закономерным чередованием циркуляционных сезонов и циркуляционных механизмов (ЭЦМ). ЭЦМ – типовой циркуляционный процесс, в течение которого в северном полушарии сохраняется географическое распределение барического поля определенного типа и направленность основных переносов воздушных масс [2, 3, 13, 15, 23]. С соответствующими ЭЦМ термическими режимами и режимами осадкообразования, таким образом, связана

изменчивость показателей баланса массы ледников [7, 10, 11].

На Скандинавском полуострове расположена крупнейшая область современного оледенения континентальной Европы. В северной части этой области, в районе полярного круга расположен крупный ледник плато – Свартисен (второй по площади в регионе), питающий выводной ледник Энгабреен [1, 4], который был выбран в качестве объекта исследований.

**Методика исследований.** Исследовалась связь балансовых показателей ледника Энгабреен (Северная Норвегия) с динамикой элементарных циркуляционных механизмов в пределах циркуляционных сезонов. Применялась методика определения вклада ЭЦМ в отклонение от средних многолетних значений показателей баланса массы, которая в основном сводилась к следующему. Для имеющихся (за период 1969/70–1994/95 гг.)

<sup>1</sup> Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-05-00134 и 07-05-939).

**Таблица 1.** Пропорция циркуляционного вклада ЭЦМ в формирование отклонения аккумуляции от среднего многолетнего значения

Тип элементарного циркуляционного механизма (ЭЦМ) по Б.Л. Дзердзеевскому (1975)	Распределение продолжительности ЭЦМ (сут) по годам с различным знаком аномалий аккумуляции				Циркуляционный вклад ЭЦМ в формирование аномалии аккумуляции	
	>0		<0		>0	<0
	общее	ср. год.	общее	ср. год.		
1а	59	4.54	34	2.62	0.63	0.37
1б	55	4.23	63	4.84	0.47	0.53
2а	3	0.23	2	0.15	0.6	0.4
2б	0	0	9	0.6	0	1
2в	4	0.31	2	0.15	0.67	0.33
3	33	2.54	18	1.38	0.65	0.35
4а	34	2.62	30	2.31	0.53	0.47
4б	8	0.62	12	0.92	0.4	0.6
4в	2	0.15	12	0.92	0.14	0.86
5а	59	4.54	43	3.31	0.58	0.42
5б	48	3.69	49	3.77	0.49	0.51
5в	29	2.23	14	1.08	0.67	0.33
5г	27	2.08	40	3.08	0.4	0.6
6	18	1.38	22	1.69	0.45	0.55
7аз	54	4.15	63	4.85	0.46	0.54
7ал	3	0.23	0	0	1	0
7бз	64	4.92	64	4.92	0.5	0.5
7бл	5	0.38	5	0.38	0.5	0.5
8а	34	2.62	83	6.38	0.29	0.71
8бз	36	2.77	41	3.15	0.47	0.53
8бл	0	0	9	0.69	0	1
8вз	26	2	48	3.69	0.35	0.65
8вл	2	0.15	4	0.31	0.33	0.67
8гз	25	1.92	80	6.15	0.24	0.76
8гл	5	0.38	2	0.15	0.71	0.29
9а	47	3.62	31	2.38	0.6	0.4
9б	31	2.38	37	2.85	0.46	0.54
10а	47	3.62	92	7.08	0.34	0.66
10б	22	1.69	46	3.54	0.32	0.68
11а	194	14.92	161	12.38	0.55	0.45
11б	98	7.54	149	11.46	0.4	0.6
11в	53	4.08	101	7.77	0.34	0.66
11г	127	9.77	100	7.69	0.56	0.44
12а	82	6.31	85	6.54	0.49	0.51
12бз	93	7.15	145	11.15	0.39	0.61
12бл	15	1.15	15	1.15	0.5	0.5
12вз	66	5.08	61	4.69	0.52	0.48
12вл	4	0.31	3	0.23	0.57	0.43
12г	145	11.15	70	5.38	0.67	0.33
13з	534	41.08	330	25.38	0.62	0.38
13л	15	1.15	40	3.08	0.27	0.73
BT	0	0	0	0	0	0

**Таблица 2.** Пропорция циркуляционного вклада ЭЦМ в формирование отклонения абляции от среднего многолетнего значения

Тип элементарного циркуляционного механизма (ЭЦМ) по Б.Л. Дзерdzeевскому (1975)	Распределение продолжительности ЭЦМ (сут) по годам с различным знаком аномалий абляции				Циркуляционный вклад ЭЦМ в формирование аномалии абляции	
	>0		<0		>0	<0
	общее	ср. год.	общее	ср. год.		
1а	2	0.18	6	0.4	0.31	0.69
1б	2	0.18	0	0	1	0
2а	61	5.55	72	4.8	0.54	0.46
2б	54	4.91	73	4.87	0.5	0.5
2в	26	2.36	51	3.4	0.41	0.59
3	53	4.82	61	4.07	0.54	0.46
4а	3	0.27	0	0	1	0
4б	86	7.82	80	5.33	0.59	0.41
4в	78	7.09	58	3.87	0.65	0.35
5а	0	0	7	0.47	0	1
5б	0	0	0	0	0	0
5в	0	0	0	0	0	0
5г	0	0	10	0.67	0	1
6	29	2.64	52	3.47	0.43	0.57
7аз	0	0	0	0	0	0
7ал	17	1.55	23	1.53	0.5	0.5
7бз	0	0	0	0	0	0
7бл	30	2.73	25	1.67	0.62	0.38
8а	23	2.09	37	2.47	0.46	0.54
8бз	0	0	6	0.4	0	1
8бл	33	3	27	1.8	0.62	0.38
8вз	3	0.27	0	0	1	0
8вл	28	2.55	26	1.73	0.6	0.4
8гз	0	0	0	0	0	0
8гл	25	2.27	23	1.53	0.6	0.4
9а	46	4.18	117	7.8	0.35	0.65
9б	31	2.82	15	1	0.74	0.26
10а	29	2.64	37	2.47	0.52	0.48
10б	67	6.09	73	4.87	0.56	0.44
11а	5	0.45	7	0.47	0.49	0.51
11б	0	0	0	0	0	0
11в	0	0	0	0	0	0
11г	0	0	15	1	0	1
12а	18	1.64	10	0.67	0.71	0.29
12бз	0	0	5	0.33	0	1
12бл	24	2.18	22	1.47	0.6	0.4
12вз	0	0	0	0	0	0
12вл	27	2.45	8	0.53	0.82	0.18
12г	0	0	3	0.2	0	1
13з	8	0.73	0	0	1	0
13л	409	37.18	702	46.8	0.44	0.56
BT	0	0	0	0	0	0

инструментальных рядов аккумуляции  $B_W$ , абляции  $B_S$  и баланса массы  $B_N$  [16–22] рассчитывались отклонения от среднего многолетнего значения. В результате были получены знакопеременные

функции, отражающие динамику балансовых показателей относительно среднего многолетнего значения. Для рассчитанных рядов по данным календаря ЭЦМ [3, 7] определялись продолжитель-

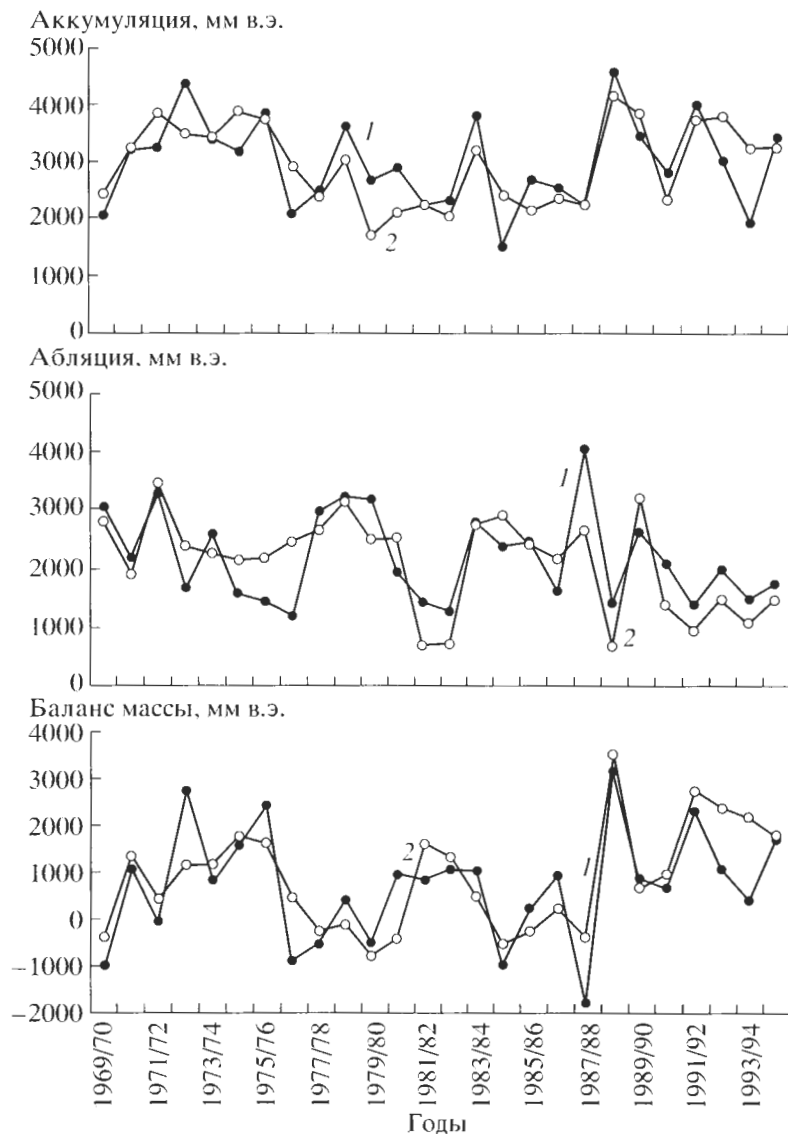


Рис. 1. Динамика балансовых показателей ледника Энгабреен за период с 1969/70 по 1994/95 г. 1 – инструментальные ряды, 2 – реконструированные ряды.

ности распределения ЭЦМ отдельно для лет с положительными и отрицательными отклонениями от среднего многолетнего за период циркуляционных сезонов предзимье–зима–предвесенье (для аккумуляции) и за летний циркуляционный сезон (для абляции). Далее для каждого балансового показателя рассчитывалась среднегодовая продолжительность (в сутках) отдельных типов ЭЦМ для лет с положительными и отрицательными отклонениями. Полагая, что связанные с отдельными ЭЦМ термические режимы и режимы осадкообразования вносят определенный циркуляционный вклад в формирование как положительных, так и отрицательных аномалий годовых значений балансовых показателей, рассчитывалась пропорциональность вклада каждого ЭЦМ

для аккумуляции и абляции (табл. 1, 2). Пропорция вклада – это выраженное в долях единицы (или в процентах) количественное соотношение вклада каждого ЭЦМ в формирование положительных и отрицательных аномалий балансового показателя. Полученный спектр пропорций циркуляционного вклада ЭЦМ в отклонение балансовых показателей от среднего многолетнего значения принимался за “ключ” для реконструкции балансовых показателей и баланса массы ледника Энгабреен. В качестве верификации “ключа” по полученным пропорциям вклада реконструировались ряды балансовых показателей за период инструментальных наблюдений (1969/70–1994/95 гг.). Рассчитанные в соответствии с пропорциональностью вклада аномалии продолжи-

**Таблица 3.** Значения абляции ледника Энгабреен и ее аномалий за период инструментальных наблюдений

Балансовый год	Абляция, мм в.э.	Отклонение от среднего многолетнего, мм в.э.
1969/70	3040	837
1970/71	2190	-13
1971/72	3290	1087
1972/73	1650	-553
1973/74	2590	387
1974/75	1570	-633
1975/76	1450	-753
1976/77	1200	-1003
1977/78	2990	787
1978/79	3220	1017
1979/80	3180	977
1980/81	1930	-273
1981/82	1430	-773
1982/83	1280	-923
1983/84	2780	577
1984/85	2490	287
1985/86	2450	247
1986/87	1630	-573
1987/88	4050	1847
1988/89	1450	-753
1989/90	2640	437
1990/91	2140	-63
1991/92	1410	-793
1992/93	2020	-183
1993/94	1530	-673
1994/95	1760	-443

тельности ЭЦМ по отдельным годам анализируемого периода (из 26 случаев в 25 для аккумуляции и в 23 для абляции) имели тот же знак, что и рассчитанные ранее отклонения годовых значений балансовых показателей от средних многолетних. Таким образом, тенденция вклада ЭЦМ с вероятностью 0.96 для аккумуляции и 0.88 для абляции соответствует формированию знака отклонения балансовых показателей. Полагая, что суммарная по модулю (за анализируемый период) аномалия вкладов ЭЦМ соответствует суммарной по модулю аномалии балансового показателя, были рассчитаны коэффициенты пропорциональности между ними. Умножением значений годовых отклонений ЭЦМ на коэффициент пропорциональности были получены реконструированные на основе пропорции вклада значения годовых отклонений балансовых показателей от среднего многолетнего. Алгебраическим сложением значений годовых отклонений балансовых показателей с соответствующими значениями среднего многолетнего были получены реконструированные значения балансовых показателей аккумуляции и абляции (рис. 1). Рассмотрим

применяемую методику более детально на примере исследования ряда абляции. Исходный ряд инструментальных значений по абляции и отклонения от среднего многолетнего значения (2203 мм в.э.; представлены в табл. 3).

Далее для этих лет (период инструментальных наблюдений) по календарю ЭЦМ определялась продолжительность в сутках отдельных ЭЦМ за летний циркуляционный сезон. Общая продолжительность летнего циркуляционного сезона и продолжительность отдельных типов ЭЦМ в сутках (в скобках) приведены в табл. 4.

Далее находится суммарная продолжительность отдельных типов ЭЦМ для лет с положительными отклонениями абляции от среднего многолетнего и лет с отрицательными отклонениями (табл. 2). Например, продолжительность типа 1а в годах с положительным отклонением составляет 2 сут, в годах с отрицательным отклонением – 6 сут. За весь период инструментальных наблюдений имеется 11 лет с положительными и 15 лет с отрицательными отклонениями. Учитывая это, рассчитываются средние годовые (отдельно для лет с положительными и отрицательными аномалиями) продолжительности отдельных типов ЭЦМ. Так, средняя годовая продолжительность ЭЦМ типа 1а для лет с положительными аномалиями составляет 0.18 сут, для лет с отрицательными аномалиями – 0.4 сут. Принимая общую среднюю продолжительность (4.18 сут) за единицу, находим пропорцию, отражающую циркуляционный вклад этого типа ЭЦМ в формирование знака аномалии (табл. 2). Циркуляционный вклад ЭЦМ типа 1а составляет 0.31 в формирование положительного отклонения и 0.69 – в формирование отрицательного. Аналогичным образом рассчитываются пропорции циркуляционного вклада для ЭЦМ всех типов (табл. 2).

Далее на основании полученной пропорции восстанавливается инструментальный ряд. Так, пересчитанные значения (безразмерные) циркуляционных вкладов (по данным табл. 4) в формирование положительных и отрицательных аномалий за период с 1988/89 по 1994/95 балансовый год приведены в табл. 5.

В нижней строке указаны суммарные значения циркуляционного вклада. По знаку они совпадают с аномалиями, приведенными в табл. 3. Для того чтобы реконструировать инструментальный ряд в единицах мм водного эквивалента, выполняются следующие расчеты. Рассчитывается модуль суммы отклонений, полученных на основании циркуляционного вклада (нижняя строка в табл. 5) за весь период. Также подсчитывается модуль аномалий в мм водного эквивалента (по данным табл. 3) за весь период. Делением значения модуля в мм водного эквивалента на значение модуля по циркуляционному вкладу получается

Таблица 4. Продолжительность отдельных типов ЭЦМ за летний циркуляционный сезон в период 1969/70–1994/95 гг.

1969/70	1970/71	1971/72	1972/73	1973/74	1974/75	1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	1979/80	1980/81	1981/82
122 сут	134 сут	107 сут	107 сут	87 сут	107 сут	102 сут	95 сут	94 сут	105 сут	105 сут	86 сут	108 сут
2а (14) 13л (54) 4а (7) 7ал (7) 12а (7) 8вл (5) 11а (5) 12вл (4) 3 (3) 6 (3) 8вз (3) 26 (2) 46 (2) 8а (2) 10а (2) 106 (2)	2а (18) 13л (62) 3 (7) 46 (6) 9а (6) 126л (6) 8вл (5) 106 (5) 1а (4) 26 (4) 86л (4) 12вл (2) 8а (5)	46 (16) 9а (12) 13л (31) 3 (9) 2а (8) 4в (7) 106 (7) 7ал (5) 8гл (5) 9а (5) 12а (6) 12вл (6) 3 (2) 10а (2)	26 (18) 46 (18) 13л (30) 4в (8) 9а (6) 8а (5) 2в (5) 3 (4) 10а (3) 106 (3) 7ал (2) 9а (4) 96 (2) 106 (2)	13л (28) 2а (9) 26 (9) 76л (9) 8вл (7) 10а (7) 106 (7) 3 (5) 46 (4) 8а (4) 9а (4) 2а (3) 8а (3) 6 (2)	2а (12) 46 (16) 13л (33) 3 (9) 2в (8) 7ал (8) 26 (6) 6 (4) 4в (3) 8а (2) 86л (2) 9а (2) 106 (2)	26 (18) 46 (18) 13л (30) 4в (8) 9а (6) 8а (5) 2в (5) 3 (4) 10а (3) 106 (3) 7ал (2) 9а (4) 96 (2) 106 (2)	13л (28) 2а (9) 26 (9) 76л (9) 8вл (7) 10а (7) 106 (7) 3 (5) 46 (4) 8а (4) 9а (4) 2а (3) 8а (3) 6 (2)	26 (19) 76л (12) 13л (18) 3 (9) 106 (8) 46 (7) 4в (5) 86л (4) 9а (4) 26 (3) 2в (3) 8а (3) 6 (2)	2а (10) 46 (21) 4в (10) 106 (18) 13л (19) 3 (7) 76л (7) 86л (4) 26 (3) 2в (3) 16 (2) 8вл (2) 9а (2)	4в (11) 8гл (10) 9а (12) 13л (21) 46 (6) 126л (6) 106 (7) 2а (5) 6 (5) 96 (3) 8а (2) 126л (2) 3 (1) 12а (1) 12вл (1) 7ал (1) 2в (1) 10а (1)	5г (10) 86л (10) 10а (14) 13л (31) 26 (9) 9а (9) 2а (4) 4в (4) 5а (4) 106 (4) 2в (3) 46 (3) 6 (3)	
1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95
104 сут	113 сут	158 сут	101 сут	98 сут	118 сут	123 сут	107 сут	101 сут	142 сут	101 сут	134 сут	109 сут
10а (10) 11г (12) 8а (8) 86л (8) 8гл (9) 9а (9) 26 (7) 8вл (7) 11а (7) 86з (6) 96 (5) 2а (4) 4в (4) 13л (6) 5а (3) 6 (3) 76л (3)	4в (10) 13л (38) 46 (9) 8вл (9) 96 (8) 10а (9) 96 (8) 86л (4) 106 (4) 3 (3) 6 (3) 8гл (3) 9а (3) 126л (2) 8а (4) 4а (3) 6 (3)	2а (13) 86л (13) 13л (44) 9а (9) 10а (9) 106 (9) 2в (7) 86л (4) 3 (7) 4а (7) 8гл (7) 76л (6) 8вл (5) 46 (4) 8а (4) 4а (3) 6 (3)	3 (10) 46 (12) 13л (33) 9а (9) 26 (6) 8гл (6) 126л (6) 4в (3) 8вл (3) 10а (3) 106 (3) 12вл (3) 2в (2) 7ал (2)	26 (11) 13л (39) 3 (8) 6 (7) 4в (6) 8а (6) 12а (5) 46 (4) 106 (4) 76л (2) 126з (2) 126л (2) 12вл (2) 7ал (2) 4а (3) 6 (3)	13л (59) 13з (8) 2в (7) 6 (5) 26 (4) 9а (4) 96 (4) 126л (4) 12вл (4) 46 (3) 7ал (3) 76л (3) 1а (2) 4в (2) 8вл (2) 12а (2) 106 (2)	13л (84) 9а (7) 2а (4) 7ал (4) 106 (4) 46 (3) 8вл (3) 126з (3) 12г (3) 1а (2) 8а (2) 8гл (2) 96 (2) 4в (2) 8вл (2) 12а (2) 106 (2)	96 (16) 10а (11) 12вл (10) 13л (39) 26 (4) 2в (4) 6 (4) 126л (4) 46 (3) 9а (3) 106 (3) 86л (2) 8вл (2) 8гл (2)	2в (12) 13л (59) 26 (7) 3 (6) 106 (4) 86л (3) 11г (3) 96 (3) 4в (2) 10а (2)	2в (20) 13л (96) 26 (9) 4а (6) 46 (4) 6 (4) 106 (3)	9а (26) 106 (10) 13л (42) 3 (4) 6 (3) 12вл (3) 76л (2) 8а (2) 8вл (2) 8гл (2) 12а (2) 2а (1) 7ал (1) 126л (1)	13л (46) 6 (16) 9а (12) 6 (7) 4в (6) 3 (8) 2а (3) 7ал (2) 8а (3) 76л (2) 126л (2) 3 (1) 12а (2) 4в (1) 7ал (1) 2в (1) 10а (1)	

Таблица 5. Годовые значения циркуляционных вкладов и аномалий абляции

1988/89		1989/90		1990/91		1991/92		1992/93		1993/94		1994/95	
>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0
36.96	47.04	11.84	4.16	4.92	7.08	8.2	11.8	9.1	16.9	4.2	7.8	20.24	25.76
2.45	4.55	5.72	5.28	25.96	33.04	42.24	53.76	5.6	4.4	41.36	52.64	6.88	9.12
2.16	1.84	8.2	1.8	3.5	3.5	4.5	4.5	18.48	23.52	3.01	3.99	4.2	7.8
2	2	17.16	21.84	3.24	2.76	3.9	2.1	2.16	1.84	3.9	2.1	6.16	4.84
2.24	1.76	2	2	2.24	1.76	2.36	1.64	1.29	1.71	2.16	1.84	4.32	3.68
1.77	1.23	1.64	2.36	1.86	1.14	1.72	2.28	2.46	0.54	1	1	1.62	1.38
1.8	1.2	1.72	2.28	0	3	1.68	1.32	1.24	0.76	1.24	0.76	1.38	1.62
0	3	2.4	1.6	2.22	0.78			0.92	1.08	1.12	0.88	1.24	0.76
0	3	1.77	1.23	1.3	0.7			1.2	0.8	1.2	0.8	1.2	0.8
0.62	1.38	1.05	0.95	1.04	0.96			1.2	0.8	0.54	0.46	1.42	0.58
0.92	1.08	1.68	1.32					1.42	0.58	0.71	0.29	0.65	0.35
1.2	0.8	1.24	0.76					0.54	0.46	0.82	0.18	0.5	0.5
1.48	0.52	1.2	0.8					0.5	0.5			0.41	0.59
53.6	69.4	1.2	0.8					0.6	0.4			0.52	0.48
53.6	69.4	58.82	48.18	46.28	54.72	64.6	77.4	46.71	54.29	61.26	72.74	50.74	58.26
-15.8		+10.64		-8.44		-12.8		-7.58		-11.48		-7.52	

коэффициент пропорциональности. Далее последовательным умножением годовых отклонений, полученных по пропорции циркуляционного вклада (нижняя строка табл. 5), на коэффициент пропорциональности восстанавливаются значения аномалий инструментального ряда в мм водного эквивалента. Наконец, суммированием реконструированных аномалий со средним многолетним значением реконструируется ряд абляции в единицах мм водного эквивалента.

Рассчитанные для восстановленных с использованием “ключа” рядов и исходных инструментальных рядов коэффициенты корреляции оказались следующими: для аккумуляции – 0.69, для абляции – 0.70, для баланса массы – 0.76. Среднегодовые разности значений исходных и реконструированных рядов (479.58 мм в.э. для аккумуляции и 520.23 для абляции) значительно меньше значений среднегодовых отклонений от среднего многолетнего (644.62 мм в.э. для аккумуляции и 646.62 для абляции), что свидетельствует о существенном приближении реконструированных рядов к инструментальным. Определенные в результате верификации достаточно высокая степень корреляционной связанности и приближения значений рядов стала основанием для реконструкции, по данным календаря ЭЦМ (с использованием “ключа”, основанного на пропорции вклада отдельных ЭЦМ в годовое отклонение балансовых показателей от среднего многолетнего значения), динамики балансовых показателей и баланса массы ледника Энгабреен за период с 1900/01 по 1969/70 г. Реконструкция ряда абляции

за период с 1900/01 балансового года по 1958/69 происходит аналогично реконструкции инструментального ряда на основании анализа распределения отдельных типов ЭЦМ по данным календаря ЭЦМ. Подобным образом за предзимний, зимний и предвесенний циркуляционные сезоны реконструируется ряд аккумуляции. Алгебраическим сложением соответствующих годовых значений аккумуляции и абляции рассчитывается реконструированный ряд баланса массы ледника.

**Результаты исследований.** В результате применения изложенной методики получены реконструированные ряды (рис. 2) аккумуляции, абляции, баланса массы ледника Энгабреен, построенная кумулятивная кривая динамики массы ледника за период с 1900 по 1995 г. (1900/01–1968/69 – реконструированные, 1969/70–1994/95 – инструментальные). На основании полученных данных определяются три эпохи в динамике массы ледника за XX столетие (рис. 3). Первая (1900/01–1946/47 гг.) характеризуется последовательным сокращением массы ледника от условного нуля (начало реконструкции) до –21 799 мм водного эквивалента. Вторая (1947/48–1971/72 гг.) – эпоха стационарного состояния массы ледника с минимальными для прошлого века значениями годового баланса массы на уровне от –21 500 до –23 750 мм в.э. Третья эпоха (1972/73–1994/95 гг. и, вероятно, далее) характеризует последовательное увеличение массы ледника. Интенсивность роста массы ледника (в среднем около 725 мм в.э. в год) в эту эпоху выше интенсивности сокращения его массы в первую эпоху (в среднем около

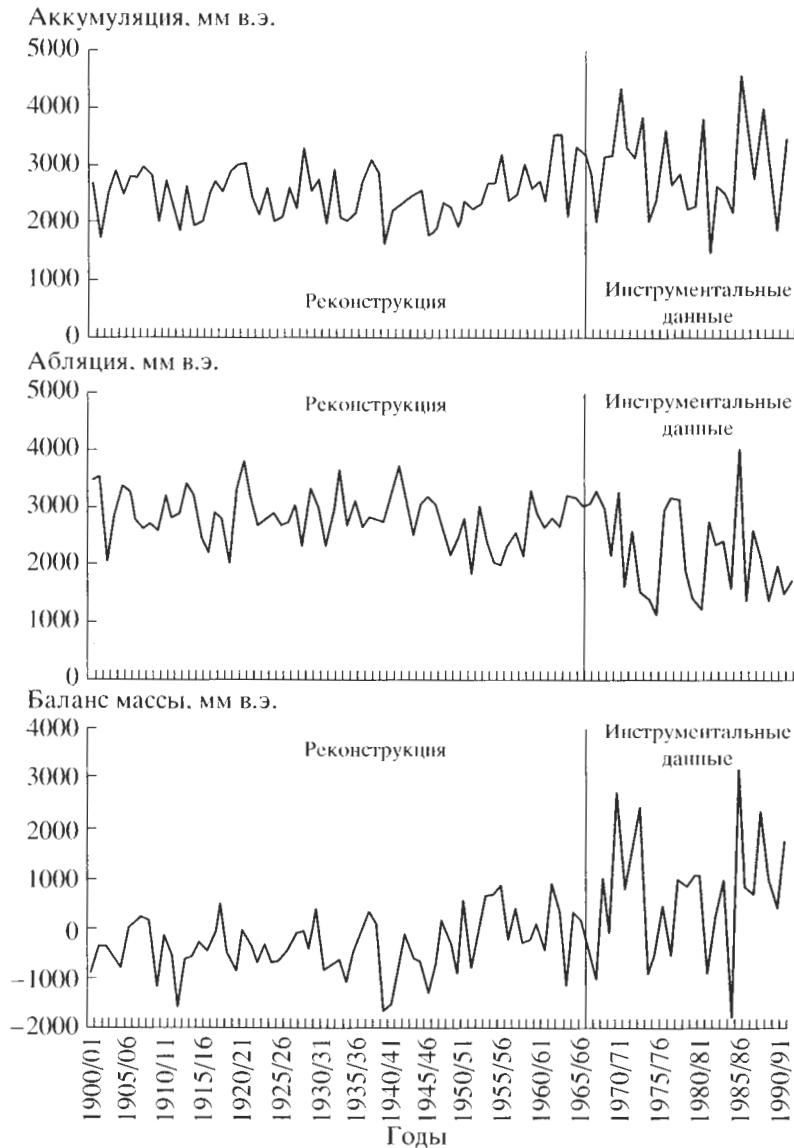


Рис. 2. Динамика балансовых показателей ледника Энгабреен за период с 1900/01 по 1994/95 г.

450 мм в.э. в год). В 1994/95 балансовом году дефицит массы по отношению к году начала реконструкции (1900/01) составлял  $-3267$  мм в.э., масса ледника соответствовала значению, характерному для 1909/10 г. При сохранении отмеченной для третьей эпохи тенденции примерно в 2000/01 г. масса ледника Энгабреен может характеризоваться максимальными за предыдущее столетие величинами.

Анализ последовательных межгодовых отклонений показателей баланса массы позволяет определять вероятность знака и величины (по вероятности повторений в ряду) отклонения показателей баланса массы по отношению к предыдущему году [14]. Подобный прогноз становится более достоверным вследствие увеличения, в результате проведен-



Рис. 3. Кумулятивная кривая баланса массы ледника Энгабреен за период с 1900/01 по 1994/95 г.



ной реконструкции, временного ряда значений показателей баланса массы и определения характерных для отдельных эпох тенденций динамики массы ледника.

**Выводы.** 1. Для реконструкции баланса массы субарктических ледников предложена статистическая макроциркуляционная модель, основанная на соотношениях среднегодовых продолжительностей ЭЦМ в годы отрицательных и положительных отклонений показателей баланса массы ледника от среднего многолетнего значения в соответствующие циркуляционные сезоны.

2. Применение модели позволило реконструировать показатели баланса массы ледника Энгабреен за период с 1900 по 1969 г., определить эпохи с различными тенденциями в динамике баланса массы и рассчитать их характеристики.

3. На основании увеличенной за счет реконструкции продолжительности исходных рядов балансовых показателей возможен вероятностный прогноз знака и величины отклонения значения показателей баланса массы для очередного года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голодковская Н.А. Ледники Скандинавского полуострова и бюджет их массы // Матер. гляциол. исследований. 1970. № 16. С. 208–231.
2. Дзердзевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Матер. метеорол. исследований. 1968. С. 240.
3. Дзердзевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат (избранные труды). М.: Наука, 1975. С. 288.
4. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники. М.: Мысль, 1989. С. 447.
5. Калесник С.В. Очерки гляциологии. М.: Гос. изд-во геогр. лит., 1963. С. 451.
6. Калесник С.В. Общая гляциология. Л.: Учпедгиз, 1939. С. 327.
7. Кононова Н.К. Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полуша-

- рия и их применение в гляциологии // Матер. гляциол. исследований. 2003. № 95. С. 45–65.
8. Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. С. 286.
9. Котляков В.М., Кренке А.Н. Ледники как индикаторы климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 18. № 11. С. 1215–1229.
10. Ледник Джанкуат / Ред. И.Я. Боярский. Л.: Гидрометеоздат, 1978. С. 184.
11. Маркин В.А. Элементарные циркуляционные механизмы и внешний массообмен на поверхности ледников // Матер. гляциол. исследований. 1972. № 20. С. 116–124.
12. Попов А.И., Тушинский Г.К. Мерзлотоведение и гляциология. М.: Высш. шк., 1973. С. 272.
13. Савина С.С., Хмелевская Л.В. Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // Матер. метеорол. исследований (циркуляция атмосферы). 1984. № 9. С. 142.
14. Федоров В.М. Модель реконструкции макроциркуляционной динамики береговой зоны арктических морей в XX столетии // Геоморфология. 2007. № 1. С. 45–50.
15. Циркуляционные механизмы современных колебаний климата / Ред. К.В. Кувшинова. М.: Наука, 1987. С. 192.
16. Fluctuations of Glaciers 1959–1965 (V. I). UNESCO. Paris, 1967. 52 с. (табл.).
17. Fluctuations of Glaciers 1965–1970 (V. II). UNESCO. Paris, 1973. 357 с.
18. Fluctuations of Glaciers 1970–1975 (V. III). UNESCO. Paris, 1977. 269 с.
19. Fluctuations of Glaciers 1975–1980 (V. IV). UNESCO. Paris, 1985. 265 с.
20. Fluctuations of Glaciers 1980–1985 (V. V.). UNESCO. Paris, 1988. 290 с.
21. Fluctuations of Glaciers 1985–1990 (V. VI). IANS–UNEP–UNESCO. Zurich, 1993. 322 с.
22. Fluctuations of Glaciers 1990–1995 (V. VII). IANS (ICSI)–UNEP–UNESCO. Zurich, 1998. P. 296.
23. Kononova N.K. Fluctuations of Northern Hemisphere atmospheric circulation in 1899–2002 // Proceedings of the International Conference “Mathematical Methods in Geophysics”. Novosibirsk. Part II. 2003. P. 405–408.

## Reconstruction of the Mass Balance Dynamic of Subarctic Glaciers in the XX Century

V. M. Fedorov

Lomonosov Moscow State University

For reconstruction of mass balance of subarctic glaciers macrocirculation model was elaborated. The model is based on proportional ratio of the average annual duration of elementary circulation mechanisms (EMS) for years with positive and negative mass balance deviations from yearly mean value in corresponding circulation seasons. Application of the model for reconstruction of parameters of Engabreen glacier provided mass balance value for the period 1900–1969, revealed periods of different trends in mass balance dynamics of the glacier and allowed to determine their characteristics. Obtained reconstructed series provide basis for probabilistic prediction of algebraic sign and magnitude of mass balance value deviation for the next year in the series.