

# Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии

В.М. Федоров

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

## Macrocirculation model for reconstruction and forecast of mass balance values for Norwegian glaciers in XX century

V.M. Fedorov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

For reconstruction and forecast of mass balance dynamics of Norwegian glaciers the macrocirculation model based on typification of Dzerdzeevsky atmospheric processes is proposed. Time variation of glacier mass balance is determined mainly by conditions of energy and mass exchange in the system glacier-atmosphere. Mass and energy exchange regime is in many respects connected with the dynamics of circulation mechanisms (ECM) in atmosphere which is described by consecutive alternation of circulation seasons and circulation mechanisms. In the paper the interconnection of energy and mass exchange regimes (corresponding to different types of ECP) and mass balance dynamics was investigated. For revelation of this connection, a method for determination of proportional contribution of ECM to mass balance deviation from average annual value is elaborated. Application of the proportional ECM contribution method provides obtaining of sequence of reconstructed accumulation, ablation and mass balance data for glaciers Engabreen (Northern Norway), Nigadsbreen, Storbreen, Olfutbreen, Hellstugubreen, Grosbreen, Hardangerekulen (Southern Norway) and making accumulation curves for glaciers mass balance for 1899-1995.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

На Скандинавском полуострове располагается крупнейшая область современного оледенения континентальной Европы, ледники которой относятся к числу наиболее изученных. Массив данных по межгодовой изменчивости балансовых показателей ледников Норвегии представлен в сборниках *Fluctuations of Glaciers*. Скандинавский полуостров испытывает сильное влияние Атлантики, проявляющееся в преобладающем переносе морских воздушных масс западного и юго-западного румбов. Это влияние особенно проявляется на западном побережье полуострова. Положение северной части полуострова в полярных широтах и близость к арктическому фронту способствует частым вторжениям холодного арктического воздуха, с чем связаны низкие зимние температуры, особенно на северо-востоке. Длительность залегания снежного покрова год от года изменяется; она больше в холодные зимы с частыми вторжениями арктических воздушных масс и меньше в мягкие зимы с преобладанием атлантических воздушных масс. Первый тип зим обусловлен слабым, а второй – силь

---

Федоров В.М. Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии // *Изменения природной среды на рубеже тысячелетий. Труды Международной электронной конференции. Тбилиси-Москва, 2006, с. 243-252. www.cetm.narod.ru/pdf/fedorov1.pdf*

ным развитием к северо-востоку отрога исландского минимума (Альман, 1961; Голодковская, 1970). Таким образом ледники Норвегии развиваются в условиях интенсивно протекающих циркуляционных атмосферных процессов с которыми, во многом, связана динамика процессов массо и энергообмена в системе атмосфера–ледник. Исследование этих связей потребовало нового подхода заключающегося в разработке алгоритма макроциркуляционного моделирования динамики балансовых показателей ледников на основе существующих схем типизации атмосферных процессов.

## 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие ледников определяется климатическими условиями, одним из которых являются особенности макроциркуляционных процессов в атмосфере. Изменение во времени баланса массы ледников, в основном, контролируется сочетанием режимов осадкообразования и термического (Шумский, 1947; Калесник, 1963; Котляков, Кренке, 1982). Эти режимы во многом связаны с динамикой циркуляционных процессов в атмосфере. Динамика макроциркуляционных процессов в атмосфере 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 (Дзердзеевский, 1968, 1975; Савина, Хмелевская, 1984; Кононова, 2003). С соответствующими ЭЦМ термическими режимами и режимами осадкообразования (условиями энерго и массообмена), таким образом, связана изменчивость показателей баланса массы ледников (Маркин, 1972; Кононова, 2003).

Исследовалась связь балансовых показателей ледников Энгабреен (северная Норвегия), Нигардсбреен, Стурбреен, Олфутбреен, Хеллстугубреен, Гросубреен, Хардангерёкулен (южная Норвегия) с динамикой элементарных циркуляционных механизмов в пределах циркуляционных сезонов. Применялась методика определения пропорции вклада ЭЦМ в отклонение от средних многолетних значений показателей баланса массы, которая, в основном, сводилась к следующему. Для имеющихся (за период 1961/62 – 1994/95 гг.) рядов  $B_w$  и  $B_s$  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 определялись продолжительности распределения ЭЦМ отдельно для лет с положительными и отрицательными отклонениями от среднего многолетнего за период циркуляционных сезонов предзимье – зима – предвесенье (для аккумуляции) и за период весенне–летних циркуляционных сезонов (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, для всех ледников рассчитывались пропорции вклада каждого ЭЦМ для аккумуляции и абляции. Полученный спектр пропорций циркуляционного вклада ЭЦМ в отклонение балансовых показателей от среднего многолетнего значения (табл. 1, 2) принимался за «ключ» для реконструкции балансовых показателей и баланса массы ледников. В качестве верификации «ключа» по полученным пропорциям вклада реконструировались ряды балансовых показателей за период инструментальных наблюдений (1961/62 – 1994/95 гг.).

Табл. 1. Пропорция циркуляционного вклада ЭЦМ в формирование отклонения аккумуляции от среднего многолетнего значения (ледник Энгабреен)

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

Табл. 2. Пропорция циркуляционного вклада ЭЦМ в формирование отклонения абляции от среднего многолетнего значения (ледник Энгабреен)

Тип элементарного циркуляционного механизма (ЭЦМ) по Б.Л.Дзердзевскому (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

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 для каждого ледника были получены реконструированные значения балансовых показателей: аккумуляции и абляции (рис. 1). Рассчитанные для восстановленных с использованием «ключа» рядов и исходных инструментальных рядов ледника Энгабреен коэффициенты корреляции оказались равными для аккумуляции – 0,69, для абляции – 0,70, для баланса массы – 0,76. Среднегодовые разности значений исходных и реконструированных рядов (475 мм. в.э. для аккумуляции и 508 для абляции) значительно меньше значений среднегодовых отклонений от среднего многолетнего (645 мм. в.э. для аккумуляции и 647 для абляции), что свидетельствует о существенном приближении реконструированных рядов к инструментальным. Результаты оценки «ключей» по анализируемым ледникам представлены в табл. 3. В качестве оценочных характеристик приведены значения коэффициентов корреляции исходных и реконструированных рядов, среднее расхождение между рядами в мм в.э. и среднее отношение в процентах среднего значения расхождения и среднего многолетнего для исходного ряда (аккумуляции и абляции) значения.

Табл 3. Оценочные характеристики инструментальных исходных и реконструированных рядов балансовых показателей ледников Норвегии

Название ледника	Аккумуляция			Абляция			Баланс массы	
	К корр.	Среднее расхождение		К корр.	Среднее расхождение		К корр.	Среднее расхождение, мм в.э.
		мм в.э.	%		мм в.э.	%		
Энгабреен	0,690	475	73,6	0,793	508	78,5	0,759	657
Нигардсбреен	0,740	396	77,9	0,554	480	99,3	0,754	563
Стурбреен	0,717	210	91,5	0,506	330	106,1	0,713	367
Олфутбреен	0,773	597	66,6	0,491	501	103,0	0,786	785
Гросубреен	0,604	196	89,3	0,599	337	95,8	0,725	314
Хардангерёкулен	0,691	431	73,3	0,567	374	96,1	0,705	563
Хеллстугубреен	0,713	185	87,3	0,508	344	100,6	0,649	405
Суммарные значения (для ледников южной Норвегии)	0,731	1795	71,8	0,521	2070	104,5	0,748	2111

Определенные в результате верификации достаточно высокая степень корреляционной связанности и приближения значений рядов стали 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 ледников Норвегии в XX столетии.

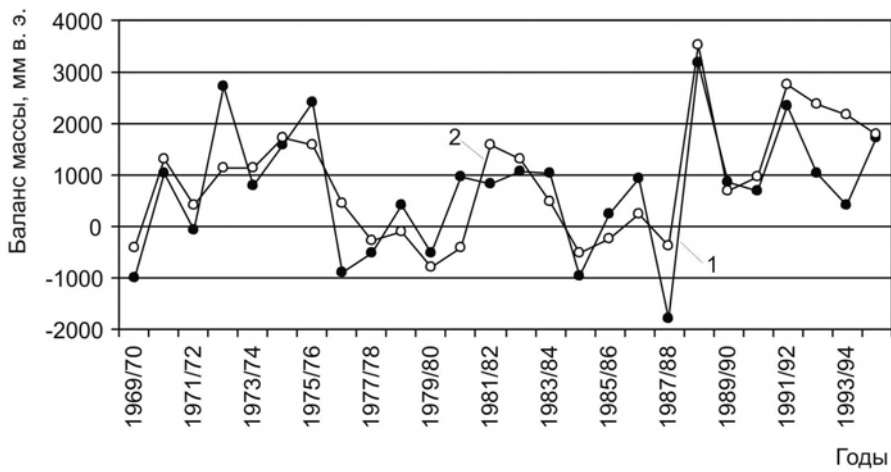
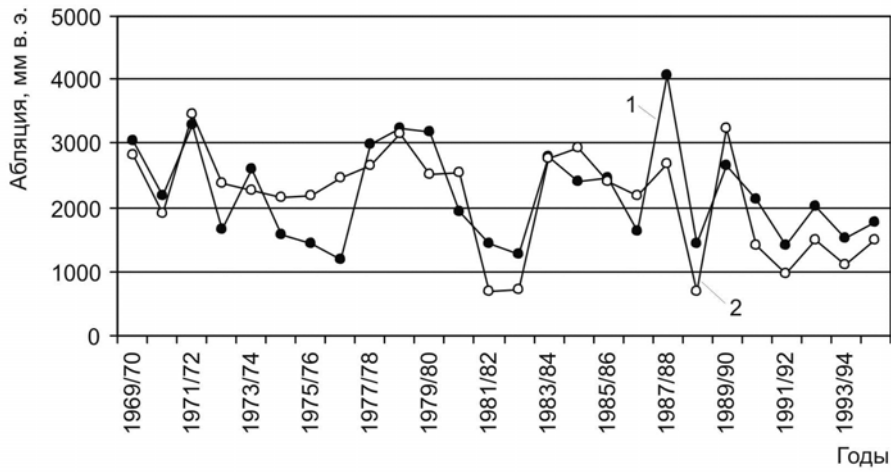
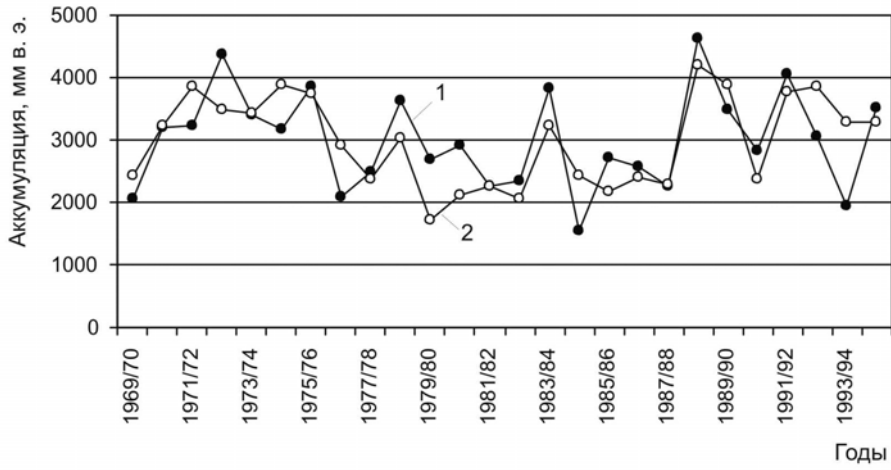


Рис.1. Динамика балансовых показателей ледника Энгабреен за период с 1969/70 по 1994/95 гг. (1 - инструментальные данные, 2 - реконструированные).  
 Fig.1. Dynamics of mass balance values for Engabreen glacier for period 1969/70 -1994/95 (1 - instrumental data, 2 - reconstructed).

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате применения методики пропорциональных вкладов ЭЦМ получены реконструированные ряды аккумуляции, абляции, баланса массы ледников Норвегии, построены кумулятивные кривые (рис. 2) динамики массы ледников за период с 1900 по 1995 гг. Анализируя приведенные в таблице 3 результаты можно отметить следующее. Все показатели баланса массы ледника Энгабреен, расположенного на широте полярного круга, реконструируются с высокими оценочными значениями коэффициента корреляции. Для ледников южной Норвегии (расположенных в районе 61 параллели) оценочные значения коэффициента корреляции для реконструкции аккумуляции и абляции существенно различаются. Так среднее значение коэффициента корреляции для аккумуляции на ледниках южной Норвегии – 0,706, а для абляции – 0,538. Таким образом, аккумуляция для ледников южной Норвегии реконструируется используемой моделью более достоверно, чем абляция. Динамика баланса массы для ледников северной и южной Норвегии реконструируется достаточно достоверно. Так значение коэффициента корреляции для баланса массы ледника Энгабреен составляет 0,759, среднее значение коэффициента корреляции для ледников южной Норвегии – 0,722, значение коэффициента корреляции по суммарным для ледников южной Норвегии показателям – 0,748. Отсюда следует, что динамика баланса массы для ледников южной Норвегии определяется в основном динамикой аккумуляции, которая в свою очередь тесно связана с циркуляционными процессами в атмосфере.

Другая особенность реконструкции динамики показателей баланса массы ледников южной Норвегии проявляется в следующем. Значения коэффициентов корреляции для аккумуляции и баланса массы западных ледников (Олфутбреен, Нигардсбреен) существенно превосходят соответствующие значения, для расположенных восточнее ледников (Стурбреен, Гросубреен, Хеллстугубреен). Средние значения коэффициентов корреляции для западных ледников (исключая расположенного южнее Хардангерёкулен) составляют для аккумуляции – 0,757, для баланса массы – 0,770, для восточных ледников – 0,678 и 0,696 соответственно. Отсюда следуют два методических вывода. Во-первых, для ледников северной Норвегии используемой макроциркуляционной моделью вполне достоверно реконструируются все балансовые показатели. Во-вторых, для ледников южной Норвегии достоверно реконструируются аккумуляция и, во многом определяемый ею, баланс массы. Слабая достоверность реконструкции абляции ледников южной Норвегии может определяться доминированием в весенне–летний период инсоляционного фактора в термическом балансе по отношению к циркуляционному (адвективному) теплообмену. Аккумуляция и баланс массы ледников южной Норвегии в основном определяются макроциркуляционной моделью. При этом западные ледники южной Норвегии моделируются с большей достоверностью, чем восточные, что определяется их различным положением по отношению к основным направлениям турбулентного массопереноса.

На основании полученных данных определяются три гляциоклиматические эпохи в динамике массы ледника Энгабреен (северная Норвегия) за XX столетие (рис. 2). Первая (1900/01 – 1946/47 гг.) характеризуется последовательным сокращением массы ледника от условного нуля (начало реконструкции) до –21799 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 –21500 до –23750 мм. в.э. Третья эпоха (1972/73 – 1994/95 гг. и, вероятно, далее) характеризует последовательное увеличение массы ледника. Средние многолетние значения для всего исследуемого периода аккумуляции и абляции составляют 2627 и 2680 мм в.э. соответственно, их значения для отдельных выделяемых эпох приведены в таблице 4.

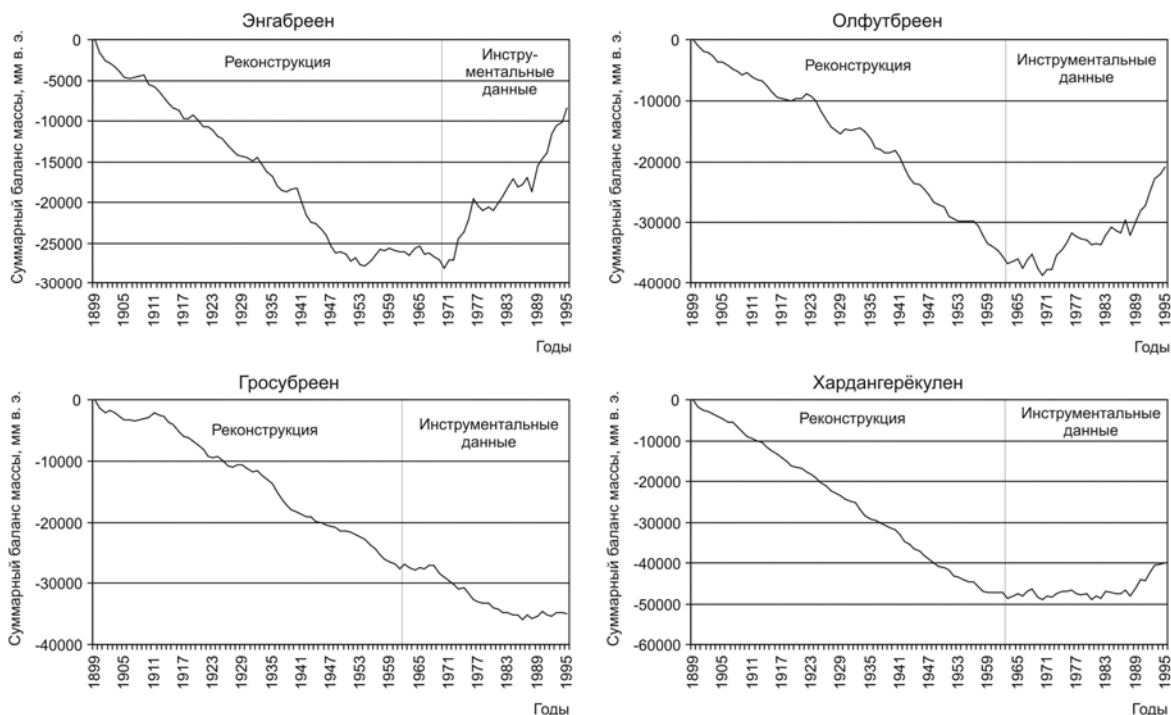


Рис. 2(1). Кумулятивные кривые баланса массы ледников Норвегии за период с 1900/01 по 1994/95 гг.  
 Fig. 2(1). Accumulation curve of mass balance value of Norwegian glaciers for period 1900/01 - 1994/95.

Табл. 4. Значения показателей баланса массы ледника Энгабреен в различные гляциоклиматические эпохи

	Гляциоклиматические эпохи		
	Первая	Вторая	Третья
Аккумуляция, мм в.э.	2432	2689	2966
Абляция, мм в.э.	2960	2709	2063
Аккумуляция/абляция	0,822	0,993	1,438

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 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 году масса ледника Энгабреен могла бы характеризоваться максимальными за предыдущее столетие величинами.

Для ледников южной Норвегии в динамике суммарной массы (ледники Нигардсбреен, Стурбреен, Олфутбреен, Хеллстугубреен, Гросубреен, Хардангерёкулен) выделяются три аналогичных эпохи, однако, хронологически не синхронные с выделяемыми для северной Норвегии (рис. 3). Так эпоха последовательного сокращения массы ледников южной Норвегии продолжается с начала века до 1962/63 года. Эпоха стационарного состояния массы ледников (равная по продолжительности аналогичной эпохи для северной Норвегии) определяется периодом 1963/64 – 1987/88 гг. Третья эпоха – последовательного увеличения массы ледников, начинается в 1988/89 и продолжается до 1994/95 (по имеющимся в нашем распоряжении данным). Т.е. начало второй и третьей эпох для ледников южной Норвегии наступает на 17 лет позже, чем для северной Норвегии. Для ледников южной Норвегии характерно обратное по отношению к северной отношение скоростей убывания и роста массы



ледников. Так скорость сокращения суммарной массы в первую эпоху составляет 3868 мм в.э., а рост в третью эпоху – 3769 мм в.э. Средние многолетние для всего исследуемого периода суммарные значения аккумуляции и абляции ледников южной Норвегии составляют 9645 и 11431 мм в.э. соответственно. Их значения для отдельных эпох приведены в таблице 5.

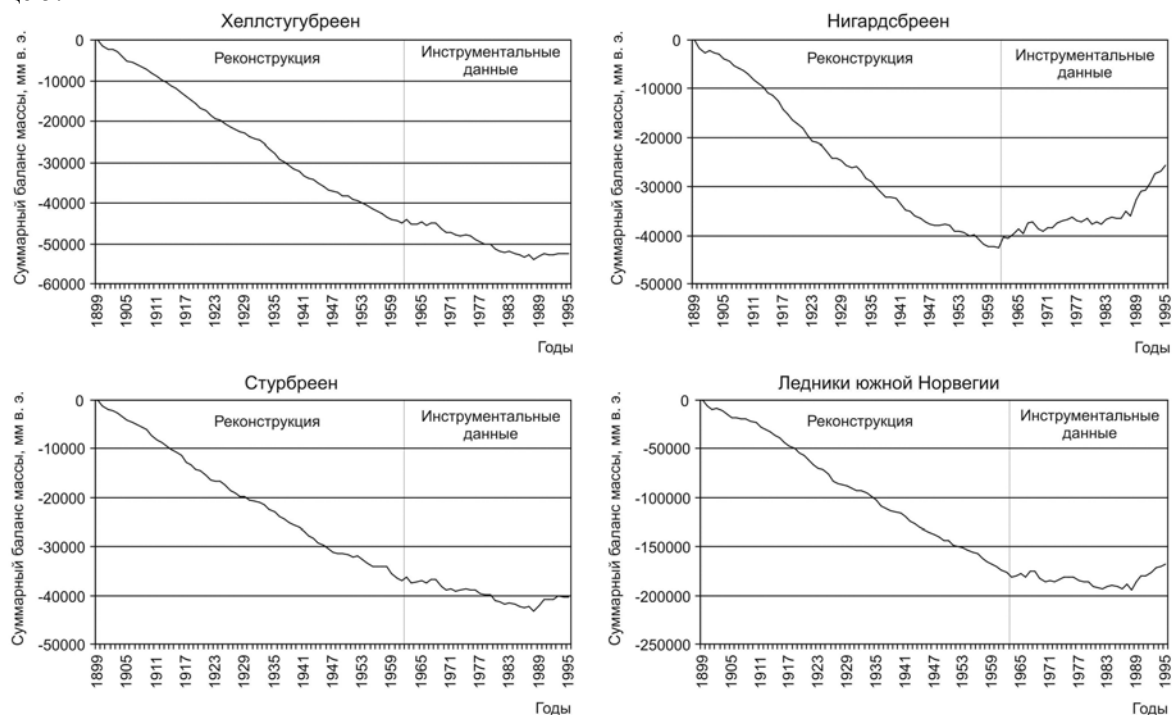


Рис. 2(2). Кумулятивные кривые баланса массы ледников Норвегии за период с 1900/01 по 1994/95 гг.  
Fig. 2(2). Accumulation curve of mass balance value of Norwegian glaciers for period 1900/01 - 1994/95.

Табл. 5. Значения суммарных показателей баланса массы ледников южной Норвегии в различные гляциоклиматические эпохи

	Гляциоклиматические эпохи		
	Первая	Вторая	Третья
Аккумуляция, мм в.э.	8934	10495	12143
Абляция, мм в.э.	12810	11152	8374
Аккумуляция/абляция	0,697	0,941	1,450

Тенденция увеличения массы ледников южной Норвегии (третья эпоха) связана в основном с развитием западных ледников южной Норвегии: Олфутюреен, Нигардсбреен, Хардангерёкулен. Для восточных ледников южной Норвегии – Хеллстугубреен, Стурбреен, Гросубреен – характерно стационарное состояние (рис. 2).

## ЛИТЕРАТУРА

- Альман Х.В. Изменение ледников и колебание климата // Материалы гляциологических исследований, № 2, 1961, с. 74 – 98.  
Голодковская Н.А. Ледники Скандинавского полуострова и бюджет их массы // Материалы гляциологических исследований, № 16, 1970, с. 208 – 231.

- Дзердзеевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований, М.: 1968, 240 с.
- Дзердзеевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат (избранные труды). М.: Наука, 1975, 288 с.
- Калесник С.В. Очерки гляциологии. Гос. изд-во географич. литературы, М.: 1963, 451 с.
- Кононова Н.К. Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // Материалы гляциологических исследований № 95, 2003, с. 45–65.
- Котляков В.М., Кренке А.Н. Ледники как индикаторы климата // Известия АН СССР, серия физика атмосферы и океана, т. 18, № 11, 1982, с. 1215 – 1229.
- Маркин В.А. Элементарные циркуляционные механизмы и внешний массообмен на поверхности ледников // Материалы гляциологических исследований, № 20, 1972, с. 116 – 124.
- Савина С.С., Хмелевская Л.В. Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований (циркуляция атмосферы), № 9, М.: Наука, 1984, 142 с.
- Шумский П.А. Энергия оледенения и жизнь ледников. ОГИЗ, гос.изд-во географич. лит-ры, М.; 1947, 60 с.