

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.32; 551.51

ПРИЧИНЫ МЕТАХРОННОСТИ В ДИНАМИКЕ БАЛАНСА МАССЫ ЛЬДА  
В ЛЕДНИКОВЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

В.М. Федоров

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, Россия, ipyf@mail.ru*

Анализ результатов реконструкции динамики баланса массы льда и данных инструментальных балансовых измерений по 125 ледникам Северного полушария выявил метасинхронность в балансовой динамике девяти ледниковых районов Северного полушария в XX в. Корреляционный анализ связи динамики баланса массы льда в ледниковых районах с макроциркуляционными характеристиками климата показал, что продолжительность действия групп циркуляции является причиной метасинхронности в динамике баланса массы льда ледниковых районов и определяет ее пространственно-временную структуру.

*Ледники, баланс массы, атмосферная циркуляция, реконструкция*

REASONS FOR THE METACHRONOUS CHARACTER OF THE DYNAMICS OF ICE MASS BALANCE  
IN THE GLACIATED REGIONS OF THE NORTHERN HEMISPHERE

V.M. Fedorov

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, Russia, ipyf@mail.ru*

The analysis of the reconstruction of the dynamics of the mass balance of glaciers and of the instrumental mass balance measurements at 125 glaciers of the Northern Hemisphere revealed methachronous dynamics of the balance of 9 glaciated regions of the Northern Hemisphere in the 20th century. The correlation analysis between the dynamics of the mass balance in the glaciated regions and the macro-circulation characteristics of climate demonstrated that the duration of the action of the groups of the atmospheric circulation was responsible for the methachronous dynamics and determined its spatial and temporal structure.

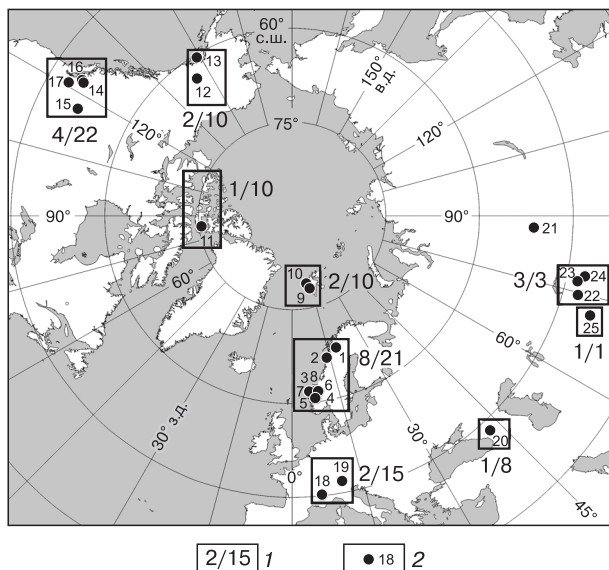
*Glaciers, the mass balance, atmospheric circulation, reconstruction*

ВВЕДЕНИЕ

Задача изучения баланса массы ледников занимает центральное место в гляциологии, поскольку соотношение прихода и расхода вещества определяет условия их существования и направление эволюции [Котляков, 1986; Котляков, Шамин, 1986; Дюрджеров, Котляков, 1987]. Важнейшим критерием в схемах гляциологического районирования является циркуляционный фактор, связывающий распространение ледников в Северном полушарии Земли с областями их питания [Бут, 1963; Кренке, 1963; Тушинский, Малиновская, 1973; Котляков, 2004]. Поэтому представляется естественным использование циркуляционных характеристик климата для исследования влияния циркуляционного фактора на динамику баланса массы ледников во времени. Для решения этой задачи были построены реконструкции динамики баланса массы льда для 25 опорных и репрезентативных

ледников Северного полушария, имеющих наиболее продолжительные ряды полных наблюдений балансовых показателей (рис. 1).

Исходной информацией для реконструкций были данные по балансовой динамике [Fluctuations of Glaciers, 1967, 1973, 1977, 1985, 1988, 1993, 1998, 2005, 2008; Dyurgerov, 2002] и “Календаря последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ)”, где с разрешением в сутки приведены типовые циркуляционные ситуации с 1899 г. по настоящее время в типизации Б.Л. Дзердзеевского и др. [Дзердзеевский и др., 1946; Савина, Хмелевская, 1984; Кононова, 2003, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>]. Каждый ЭЦМ представляет собой единый целостный макропроцесс, в течение которого в Северном полушарии сохраняется географическое распределение барического поля определенного типа и на-



**Рис. 1. Схема расположения исследуемых ледников и ледниковых районов.**

1 – ледниковые районы: числитель – число ледников с реконструкцией балансовых показателей, знаменатель – число ледников с балансовыми наблюдениями; 2 – ледники, для которых выполнены реконструкции: 1 – Стурглясьерен, 2 – Энгабреен, 3 – Олфутбреен, 4 – Гросубреен, 5 – Хардангерулен, 6 – Хеллстугубреен, 7 – Нигардсбреен, 8 – Стурбреен (Скандинавия); 9 – Ловен Средний, 10 – Бреггер Восточный (Шпицберген); 11 – Девон (Канадский Арктический архипелаг); 12 – Гулкана, 13 – Вулверин (Аляска); 14 – Плейс, 15 – Пейто, 16 – Сентинел, 17 – Южный Каскадный (Кордильеры); 18 – Сареннский, 19 – Хинтерайсфернер (Альпы); 20 – Джанкуат (Кавказ); 21 – Малый Актру (Алтай); 22 – Голубина, 23 – Туюксу, 24 – Карабаткак (Тянь-Шань); 25 – Абрамова (Памиро-Алай).

правленность основных переносов воздушных масс. В этой типизации ЭЦМ объединены в четыре группы циркуляции (меридиональная южная, меридиональная северная, нарушения зональности и зональная), отражающих соотношение зональных и меридиональных переносов воздушных масс.

#### МЕТОДИКА АППРОКСИМАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ БАЛАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Связь циркуляционных характеристик климата находилась в предположении о том, что каждому ЭЦМ на полушарии соответствуют определенные погодные условия в конкретном месте (температурный режим и режим атмосферных осадков). Эти условия и определяют развитие ледников. Связь циркуляционных характеристик (продолжительность действия ЭЦМ) с балансовыми показателями была найдена в виде пропор-

ции циркуляционного вклада каждого ЭЦМ в отклонение балансового показателя (аккумуляция, абляция) от среднего многолетнего значения или в формирование знака и величины аномалии балансового показателя [Федоров, 2007, 2009].

Пропорция вклада определялась следующим образом. Из ряда значений балансового показателя вычиталось среднее многолетнее значение. В результате была получена знакопеременная функция – аномалия балансового показателя (аккумуляции, абляции). Далее для лет с положительными и отрицательными аномалиями отдельно находились суммарные значения продолжительности действия ЭЦМ всех типов за некоторый период года (например, зимний для аккумуляции и летний для абляции). Для ЭЦМ каждого типа в результате была получена пропорция циркуляционного вклада в формирование знака и величины аномалии балансового показателя. Полученные пропорции проверялись восстановлением значений исходных инструментальных рядов по данным “Календаря последовательной смены ЭЦМ”. В качестве оценочных характеристик при этом принимались коэффициент корреляции между восстановленным и исходным рядами и расхождение между этими рядами в миллиметрах водного эквивалента (мм в.э.) и в процентах от среднего модуля аномалии исходного ряда. Изменением даты начала и продолжительности периода (аккумуляции, абляции) путем перебора находилось такое его значение, при котором величина коэффициента корреляции была максимальной, а расхождение – минимальным. Восстановленный ряд принимался за циркуляционную модель балансового показателя.

Алгоритм расчета пропорции, восстановления ряда и поиска периодов аккумуляции и абляции с оптимальными значениями оценочных характеристик был формализован в компьютерной программе, использование которой позволило обработать значительные массивы данных. При этом была реализована возможность задания периодов аккумуляции и абляции как в календарной системе, так и в долях циркуляционных сезонов. Это позволило создавать две модификации моделей балансовых показателей – календарную и сезонную.

На основе найденной формы связи были выполнены реконструкции динамики баланса массы льда 25 ледников Северного полушария. Построение реконструкций включало четыре этапа.

1. Поиск периодов аккумуляции и абляции с устойчивой связью циркуляционных и гляциологических характеристик.

2. Восстановление рядов инструментальных наблюдений по полученным периодам.

3. Расчет средних моделей рядов инструментальных наблюдений.

4. Расчет моделей реконструкции по данным “Календаря последовательной смены ЭЦМ” и выбор оптимальной модели.

**Первый этап.** Исходные ряды инструментальных наблюдений делились приблизительно (или точно при четном значении продолжительности ряда) пополам. Один интервал назначался базовым, а другой – тестовым. По базовому полуинтервалу (для некоторого периода аккумуляции или абляции) рассчитывалась пропорция циркуляционного вклада и по ней восстанавливался второй (тестовый) полуинтервал исходного ряда. Перебором находились периоды аккумуляции и абляции такие, при которых обе (базовая и тестовая) половины ряда имели оптимальные значения оценочных характеристик: максимальные значения коэффициента корреляции и минимальные значения расхождения между соответствующими половинами восстановленных и исходных рядов. Затем статус полуинтервалов менялся.

С этого этапа применялось нормирование по сумме значений ряда. То есть сумма значений исходного полуинтервала принималась за норму. К ней умножением всех членов ряда на коэффициент пропорциональности приравнивалась сумма значений восстановленного полуинтервала. Это позволяло минимизировать, например, погрешности, связанные с восстановлением аккумуляции за зимний период для ледников, развивающихся в условиях резко континентального климата со значительной долей летней аккумуляции.

В результате первого этапа для каждой половины ряда аккумуляции и абляции были получены по два периода в четырех вариантах (календарной и сезонной модификациях с подразделением каждой на нормированную и ненормированную) с устойчивой связью циркуляционных и балансовых характеристик.

**Второй этап.** По найденным периодам с устойчивой связью восстанавливались полные ряды инструментальных наблюдений.

**Третий этап.** Два полученных модельных ряда (по двум найденным для этого ряда периодам) для одного исходного ряда инструментальных наблюдений между собой коррелируют, как правило, слабо. Однако они имеют хорошую связь с рядом, образованным их средними значениями. Средние модели имеют кроме этого максимальные значения коэффициента корреляции с исходными рядами и минимальные расхождения с ними. Таким образом, в качестве моделей реконструкции с начала XX в. до начала инструментальных наблюдений принимались средние модели балансовых показателей.

**Четвертый этап.** Ряды балансовых показателей восстанавливались по данным “Календаря последовательной смены ЭЦМ” с 1900 г. с использованием найденных периодов аккумуляции и аб-

ляции с устойчивой связью циркуляционных и балансовых характеристик и пропорций циркуляционного (весового) вклада ЭЦМ в формирование величины и знака аномалии (полученных для полных рядов инструментальных наблюдений).

Всего для 25 ледников было получено 600 моделей реконструкции балансовых показателей, по которым рассчитано 300 средних моделей и по ним – 100 средних моделей реконструкции суммарного баланса. В связи с этим возникла необходимость в классификации для выбора оптимальных моделей. Классификация включала два уровня. На первом уровне сравнивались конечные значения двух кумулятивных кривых (на год, предшествующий началу балансовых наблюдений), рассчитанных по двум моделям реконструкции внутри модификации (каждой из четырех). На втором уровне сравнивались конечные значения двух средних моделей реконструкции, относящихся к различным модификациям. По результатам минимальных расхождений суммарных балансов и средних квадратических отклонений было отобрано 25 оптимальных средних моделей реконструкции.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения статистически достоверной балансовой информации по ледниковым районам к полученным балансовым характеристикам опорных и репрезентативных ледников были добавлены имеющиеся для рассматриваемых ледниковых районов инструментальные данные по балансу массы ледников [*Fluctuations of Glaciers, 1967, 1973, 1977, 1985, 1988, 1993, 1998, 2005, 2008; Dyurgerov, 2002*]. Таким образом, по реконструированным данным (для 25 ледников) и данным инструментальных наблюдений по 125 ледникам, относящимся к девяти ледниковым районам Северного полушария был сформирован общий массив данных по балансовой динамике (из рассмотрения был исключен Алтай в связи с небольшой продолжительностью рядов и неоднозначностью исходных данных). При этом реконструированные значения баланса массы были получены за 1493 года, а данные балансовых наблюдений охватывали 2511 лет (всего 3004 года). В результате суммирования и осреднения балансовых данных по отдельным ледникам рассчитывался баланс массы льда для каждого района в XX в. и строились региональные кумулятивные кривые (рис. 2).

Из обобщенных по ледниковым районам данных по динамике баланса массы следует, что в Скандинавии с начала века до середины 1960-х гг. происходило сокращение массы льда. В среднем за год масса ледников в это время сокращалась на 277 мм в.э. С середины 1960-х гг. для этого района

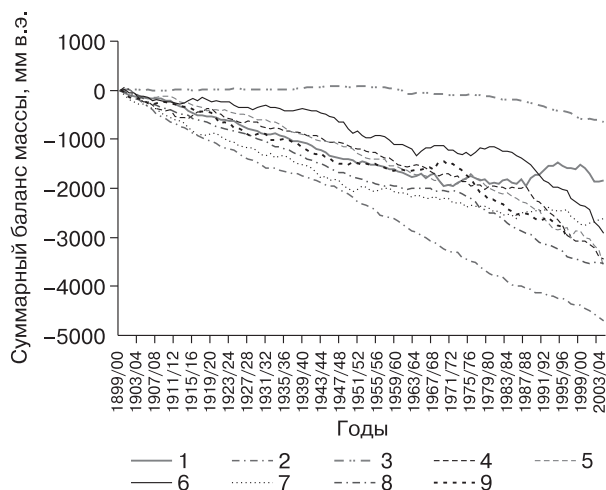


Рис. 2. Динамика суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария в XX в.

1 – Скандинавия, 2 – Шпицберген, 3 – Канадский Арктический архипелаг, 4 – Аляска, 5 – Кордильеры, 6 – Альпы, 7 – Кавказ, 8 – Тянь-Шань, 9 – Памиро-Алай.

характерна стабилизация массы ледников (квазистационарный этап). Средняя величина потери массы за год в это время составляет 16 мм в.э.

Для **Шпицбергена** потеря массы льда отмечается в течение всего XX столетия. Темпы сокращения массы меняются, но в среднем ежегодная потеря массы льда составляет 443 мм в.э.

Для **Канадского Арктического архипелага** с начала столетия до конца 1970-х гг. масса ледников характеризуется стабильным состоянием (квазистационарный этап). Средняя ежегодная потеря массы льда в этот период составляет 11 мм в.э. Однако с конца 1970-х гг. отмечается резкое сокращение массы ледников в среднем на 195 мм в.э. за год.

Для **Аляски** с начала столетия до середины 1970-х гг. отмечается сокращение массы льда со средним годовым дефицитом в 253 мм в.э. С середины 1970-х до конца 1980-х гг. масса ледников стабилизируется. Среднегодовое значение баланса массы в этот период составляет 4 мм в.э. С конца 1980-х гг. наблюдается резкое сокращение массы льда со средней за год величиной потери 876 мм в.э.

В **Кордильерах** с начала столетия до начала 1970-х гг. отмечается сокращение массы льда, которое характеризуется среднегодовой потерей в 275 мм в.э. В период с начала 1970-х до начала 1980-х гг. происходит снижение темпов сокращения массы. В среднем за год дефицит массы составляет 97 мм в.э. С начала 1980-х гг. отмечается резкое уменьшение массы льда на 720 мм в.э. в среднем за год для района.

В **Альпах** с начала XX в. до середины 1940-х гг. отмечается сокращение массы льда, темпы которого невелики – ежегодные потери в среднем составляют 106 мм в.э. Период с середины 1940-х до середины 1960-х гг. характеризуется более высокими темпами сокращения массы (средняя за год потеря массы составляет 427 мм в.э.). С середины 1960-х до середины 1980-х гг. масса льда в районе стабилизируется. Среднегодовое значение баланса массы льда для района составляет 47 мм в.э. С середины 1980-х гг. отмечается резкое сокращение массы ледников, темпы которого характеризуются средней потерей за год в 788 мм в.э.

На **Кавказе** с начала XX в. до начала 1950-х гг. отмечается сокращение массы льда в среднем за год на 404 мм в.э. В 1950-х гг. наблюдалась стабилизация массы ледников при среднем для района годовом значении баланса массы, равном 88 мм в.э. С начала 1960-х до середины 1980-х гг. масса льда в районе сокращается, но темпы сокращения значительно меньше, чем в первую половину столетия. Среднегодовое значение баланса массы льда для района составляет –222 мм в.э. С середины 1980-х гг. отмечается стабилизация в динамике баланса массы льда, при этом среднегодовое значение баланса массы равно 1 мм в.э.

На **Тянь-Шане** с начала столетия до конца 1950-х гг. в целом масса ледников сокращается. В среднем за год потери массы в этот период составляют 336 мм в.э. С конца 1950-х до середины 1970-х гг. в динамике баланса массы ледников отмечается стабилизация, характеризующаяся среднегодовым значением баланса массы –57 мм в.э. С середины 1970-х гг. наблюдается резкое сокращение массы ледников со среднегодовым дефицитом массы в 455 мм в.э.

На **Памиро-Алае** с начала века до начала 1950-х гг. масса ледников сокращается в среднем для района на 286 мм в.э. в год. В период с начала 1950-х до начала 1970-х гг. для динамики массы ледников этого района характерна стабилизация при среднегодовом значении баланса массы, равном 41 мм в.э. С начала 1970-х гг. отмечается резкое сокращение баланса массы льда, темпы которого характеризуются ежегодными потерями, в среднем составляющими 534 мм в.э.

В целом за XX столетие максимальная суммарная потеря массы льда характерна для Шпицбергена (46,9 м в.э.), минимальная – для Канадского Арктического архипелага (6,5 м в.э.). В настоящее время максимальные темпы сокращения массы ледников отмечены для Аляски (годовой баланс массы с конца 1980-х гг. в среднем составляет –876 мм в.э.), Альп (–788 мм в.э. с середины 1980-х гг.) и Кордильер (–720 мм в.э. с начала 1980-х гг.). Стабилизация в динамике баланса массы льда в настоящее время характерна для

Таблица 1. Значения регионального индекса связи

Ледниковый район	Скандинавия	Шпицберген	Канадский Арктический архипелаг	Аляска	Кордильеры	Альпы	Кавказ	Тянь-Шань
Скандинавия								
Шпицберген								
Канадский Арктический архипелаг	<b>-0,827</b>							
Аляска	<b>-0,509</b>		<b>0,760</b>					
Кордильеры			0,379	0,339				
Альпы	-0,302		<b>0,592</b>	<b>0,598</b>	<b>0,795</b>			
Кавказ	<b>0,530</b>		-0,248		-0,105			
Тянь-Шань	-0,216	-0,110				0,119		
Памиро-Алай		-0,178		0,165	0,167			<b>0,706</b>

ледников Скандинавии (-16 мм в.э. с середины 1960-х гг.) и Кавказа (1 мм в.э. с середины 1980-х гг.).

По полученным средним для ледниковых районов годовым значениям баланса массы льда находились их средние для различных временных диапазонов значения. Определялись средние значения баланса массы льда за 5, 10, 15, 20 и 25 лет. Затем попарно для всех ледниковых районов рассчитывались значения коэффициента корреляции баланса массы льда по соответствующим временным диапазонам.

В 5- и 10-летних диапазонах значения коэффициента корреляции рассчитывались с учетом изменения фазы. То есть первый 5-летний диапазон, по которому проводились осреднение и корреляция, смещался по времени от 1900–1904 гг. с интервалом в 1 год последовательно до 1901–1905, 1902–1906, 1903–1907, 1904–1908 гг. (соответственно смещались и остальные, следующие за первым 5-летние диапазоны). Затем находились средние значения коэффициента корреляции по всем фазам 5-летнего диапазона. Аналогично рассчитывались региональные коэффициенты корреляции для 10-летнего диапазона. Таким образом, были определены средние по диапазонам (5, 10, 15, 20 и 25 лет) значения коэффициента корреляции (со статистической значимостью 0,9) между значениями баланса массы льда отдельных ледниковых районов. Полученные средние по всем диапазонам значения коэффициента корреляции принимались за показатель уровня региональной связи в динамике баланса массы льда.

Устойчивость связи оценивалась числом диапазонов (5, 10, 15, 20 и 25 лет), в которых коэффициент корреляции имел статистическую значимость (при вероятности 0,9). На основе этих показателей (уровня и устойчивости связи) определялся региональный индекс связи, который принимался равным произведению показателя уровня связи на показатель устойчивости связи. При этом показатель устойчивости связи опреде-

лялся в долях единицы в соответствии с числом диапазонов: пять диапазонов – 1,0; четыре диапазона – 0,8; три диапазона – 0,6; два диапазона – 0,4; один диапазон – 0,2. Полученные значения регионального индекса связи приведены в табл. 1.

В связи с тем, что значения регионального индекса связи изменяются от -1,0 до 1,0, значения по модулю, превышающие 0,5, считались высокими (в табл. 1 выделены жирным шрифтом), а меньшие и равные 0,5 – низкими. В соответствии со значениями регионального индекса связи региональная связь баланса массы принималась высокой или низкой.

На основе корреляционного анализа, проведенного по осредненным за 5, 10, 15, 20 и 25 лет значениям баланса массы льда, и обобщения полученных данных выявляется *метахронность* в динамике баланса массы льда по отдельным ледниковым районам Северного полушария. Средние для всех диапазонов (5, 10, 15, 20, 25 лет) значения баланса массы льда, полученные для Канадского Арктического архипелага, Аляски, Кордильер и Альп имеют положительные корреляционные связи между собой (т. е. изменение баланса массы льда в этих районах происходит квазисинхронно). Положительными (для всех диапазонов осреднения) значениями коэффициента корреляции характеризуется связь динамики баланса массы льда в Скандинавии и на Кавказе (динамика баланса массы льда характеризуется квазисинхронностью). Таким образом, при осреднении (обобщении) данных оформляются два блока районов, внутри которых динамика баланса массы льда характеризуется положительными корреляционными связями. Между районами, относящимися к различным блокам, отмечаются отрицательные корреляционные связи в динамике баланса массы льда (т. е. динамика баланса массы характеризуется асинхронностью). Таким образом, в динамике баланса массы льда для отдельных ледниковых районов Северного полушария отмечается метахронность.

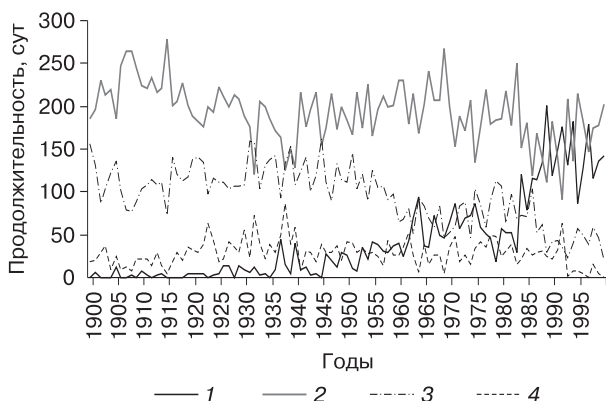


Рис. 3. Динамика продолжительности действия групп циркуляции в период 1900–1999 гг. [Конова, 2009]:

1 – меридиональная южная; 2 – меридиональная северная; 3 – нарушения зональности; 4 – зональная.

Для каждого региона рассчитывались значения коэффициента корреляции между средними значениями баланса массы льда и средними значениями продолжительности действия отдельных групп циркуляции за периоды 5, 10, 15, 20, 25 лет (рис. 3). В 5- и 10-летних диапазонах находились средние значения коэффициента корреляции с учетом сдвига по фазе.

Как и при расчете регионального индекса связи, средние по отдельным диапазонам значения коэффициента корреляции принимались за показатель уровня связи. Аналогично определялся и

Таблица 2. Значения циркуляционного индекса связи

Ледниковый район	Группы циркуляции*			
	МЮ	МС	НЗ	З
Скандинавия	0,818	-0,217	-0,741	
Шпицберген		-0,618		
Канадский Арктический архипелаг	-0,941		0,930	0,222
Аляска	-0,793	0,163	0,578	0,377
Кордильеры	-0,578	0,482	0,081	
Альпы	-0,605		0,231	0,204
Кавказ	0,567		-0,516	
Тянь-Шань		0,087		
Памиро-Алай		0,242		

\* Группы циркуляции: МЮ – меридиональная южная, МС – меридиональная северная, НЗ – нарушения зональности, З – зональная.

показатель устойчивости. Умножением показателей были найдены значения циркуляционного индекса связи для отдельных ледниковых районов (табл. 2).

В результате были получены схемы соотношений межрегиональных балансовых связей и связей динамики баланса массы льда с продолжительностью действия групп циркуляции для различных временных диапазонов (5, 10, 15, 20 и 25 лет) и построена обобщенная схема, отражающая региональные и циркуляционные индексы связи для исследуемых ледниковых районов (рис. 4).

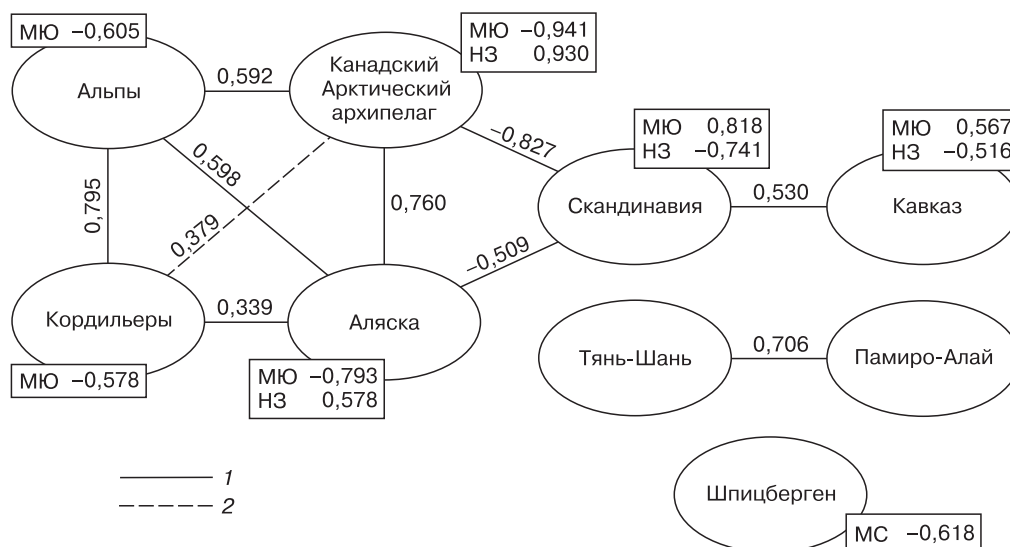


Рис. 4. Региональные и циркуляционные индексы связи.

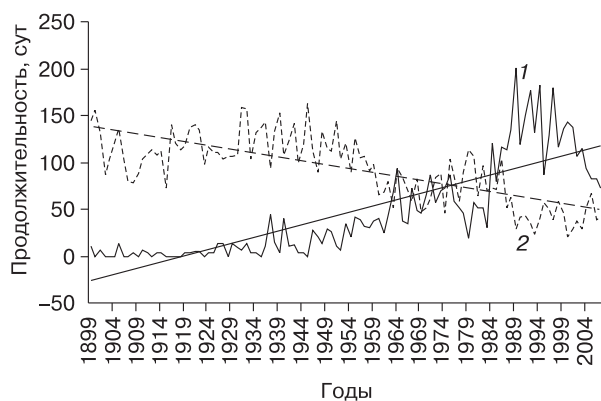
1 – сильные региональные связи (>0,5); 2 – слабые региональные связи (<=0,5). Группы циркуляции: МЮ – меридиональная южная, МС – меридиональная северная, НЗ – нарушения зональности.

При выявленных региональных особенностях (различиях и сходствах) динамики баланса массы отмечаются особенности в связях динамики баланса массы льда в отдельных регионах с продолжительностью действия групп циркуляции. Так, для ледниковых районов Канадского Арктического архипелага, Аляски, Кордильер и Альп (с квазисинхронной динамикой баланса массы) отмечаются отрицательные корреляционные связи динамики баланса массы льда с продолжительностью действия группы меридиональной южной циркуляции и положительные связи с продолжительностью действия группы нарушения зональности.

Для ледниковых районов Скандинавии и Кавказа характер связей динамики баланса массы льда с продолжительностью действия этих групп циркуляции противоположный. То есть динамика баланса массы льда в этих районах характеризуется положительными корреляционными связями с продолжительностью действия группы меридиональной южной циркуляции и отрицательными связями с продолжительностью действия группы нарушения зональности.

Таким образом, отмеченные региональные особенности (метахронность) в динамике баланса массы льда объясняются влиянием циркуляционных факторов, прежде всего продолжительностью действия группы меридиональной южной циркуляции и группы нарушения зональности.

Для всех диапазонов отмечается положительная связь динамики баланса массы на Тянь-Шане и Памиро-Алае. Однако связь с циркуляционными факторами здесь (в областях резко континентального климата) выражена слабо. Только для 5-летнего диапазона характерны положительные связи динамики баланса массы льда с продолжительностью действия группы меридиональной северной циркуляции.



**Рис. 5.** Динамика продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции (линия 1) и группы нарушения зональности (линия 2) и соответствующие линейные тренды в XX в.

Особое положение в схемах занимает Шпицберген. Динамика массы льда в этом районе определяется в основном отрицательной корреляционной связью с продолжительностью действия группы меридиональной северной циркуляции.

Наиболее значимыми циркуляционными факторами для исследованных районов являются группы меридиональной южной циркуляции и нарушения зональности. Изменчивость продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции связана с динамикой средних значений баланса массы льда в шести ледниковых районах (проявляется в 27 диапазонах осреднения). Изменчивость продолжительности действия группы нарушения зональности также значимо проявляется в динамике средних значений баланса массы льда (в тех же районах), но выражена в 21 диапазоне. В общем, на эти группы атмосферной циркуляции приходится 70,6 % обнаруженных связей (при статистической значимости коэффициента корреляции с вероятностью 0,9). Средние по шести районам значения циркуляционного индекса связи составляют по модулю для группы меридиональной южной циркуляции 0,623, для группы нарушения зональности — 0,512.

При сохранении отмеченных для XX в. тенденций в изменении продолжительности групп циркуляции с учетом найденных связей продолжительности их действия с динамикой баланса массы льда (рис. 5) в ближайшем будущем следует ожидать уменьшения темпов деградации ледников в Скандинавии и на Кавказе и увеличения темпов сокращения массы ледников Канадского Арктического архипелага, Аляски, Кордильер и Альп. То есть при сохранении указанных тенденций контрастность метахронности в ближайшем будущем усилится. Темпы сокращения массы ледников Шпицбергена в ближайшем будущем существенно не изменятся или немного замедлятся.

Тенденции изменения продолжительности действия групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности) и выводы, основанные на связи динамики баланса массы льда с продолжительностью действия этих групп циркуляции, находят подтверждение в тенденциях (трендах) динамики баланса массы (рис. 6).

Полученные связи макроциркуляционных характеристик с динамикой баланса массы льда имеют качественное объяснение в соответствии с исходной типизацией атмосферных процессов [Дзердзеевский, 1968, 1973], которое подтверждается значениями коэффициента корреляции средних (за периоды 5, 10, 15, 20 и 25 лет) значений действия ЭЦМ типов 13з (зимний) и 13л (летний), образующих группу меридиональной южной циркуляции за соответствующие периоды (табл. 3).

ПРИЧИНЫ МЕТАХРОННОСТИ В ДИНАМИКЕ БАЛАНСА МАССЫ ЛЬДА В ЛЕДНИКОВЫХ РАЙОНАХ

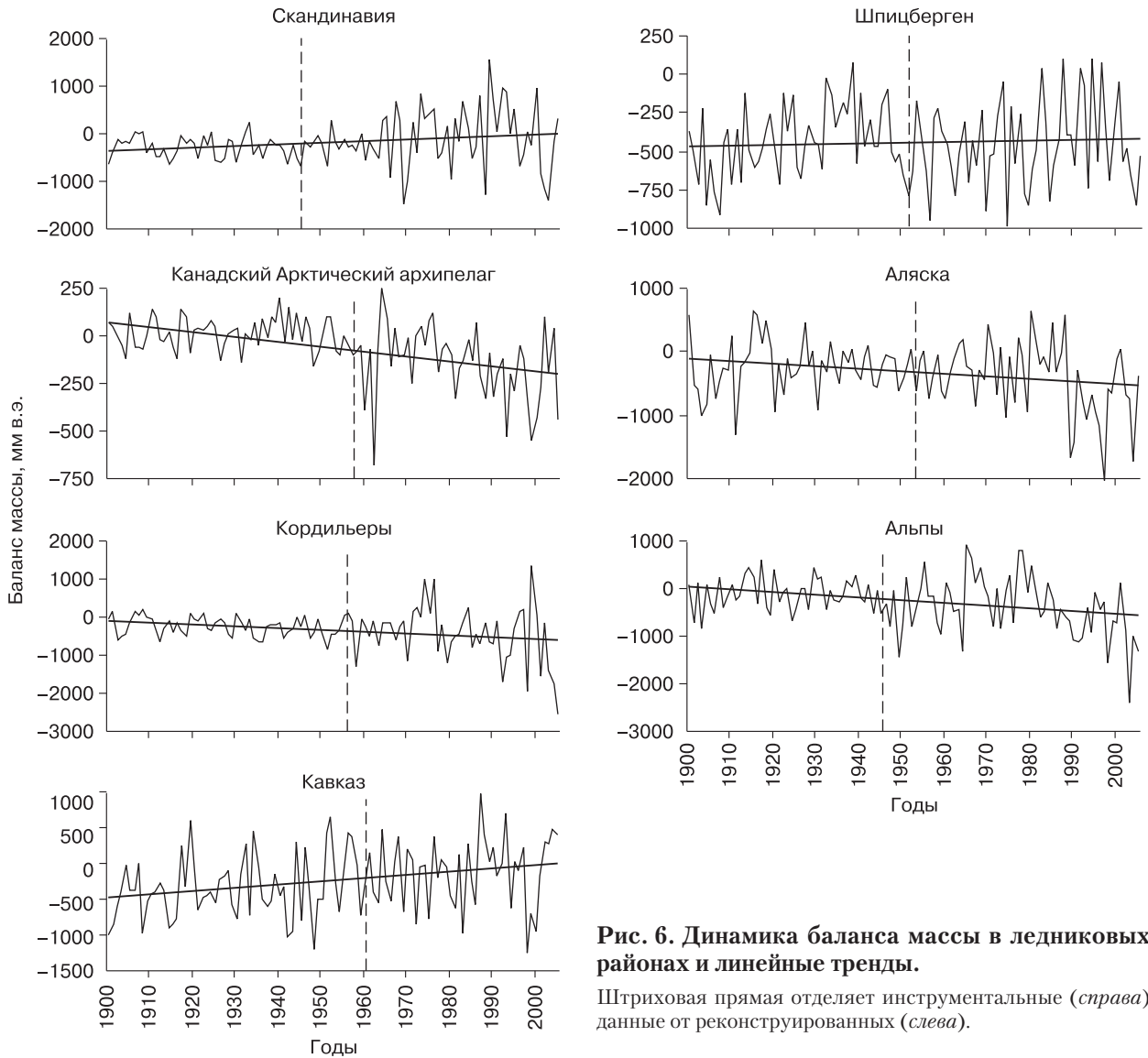


Рис. 6. Динамика баланса массы в ледниковых районах и линейные тренды.

Штриховая прямая отделяет инструментальные (справа) данные от реконструированных (слева).

Таблица 3. Корреляционная связь продолжительности действия ЭЦМ типов 13з и 13л со средними значениями аккумуляции и абляции

Ледниковый район	Интервал корреляции, лет					Балансовый показатель/тип ЭЦМ
	5	10	15	20	25	
Скандинавия	<b>0,847</b>	<b>0,949</b>	<b>0,995</b>	<b>0,992</b>	<b>0,988</b>	Аккумуляция/13з
Канадский Арктический архипелаг	<b>0,808</b>	<b>0,877</b>	<b>0,941</b>	<b>0,914</b>	<b>0,958</b>	Абляция/13л
Кордильеры	<b>-0,659</b>	<b>-0,850</b>	<b>-0,842</b>	<b>-0,906</b>	-0,908	Аккумуляция/13з
	<b>0,607</b>	0,611	0,737	-	-	Абляция/13л
Аляска	<b>-0,727</b>	<b>-0,892</b>	<b>-0,853</b>	<b>-0,887</b>	-0,917	Аккумуляция/13з
	<b>-0,715</b>	<b>-0,908</b>	<b>-0,928</b>	-0,845	-0,936	Абляция/13л
Альпы	<b>0,811</b>	<b>0,851</b>	<b>0,888</b>	0,860	<b>0,951</b>	Абляция/13л
Кавказ	<b>0,846</b>	<b>0,881</b>	<b>0,980</b>	<b>0,984</b>	<b>0,996</b>	Аккумуляция/13з

Примечание. Статистическая значимость коэффициента корреляции 0,9, для выделенных значений – 0,95.



Данные анализировались по шести ледниковым районам (Скандинавия, Канадский Арктический архипелаг, Аляска, Кордильеры, Альпы и Кавказ), для которых продолжительность действия группы меридиональной южной циркуляции выделяется в качестве ведущего циркуляционного фактора (см. табл. 2). Блок данных состоял из данных по аккумуляции и абляции для 63 ледников продолжительностью 2321 год для каждого показателя. При этом 1110 лет были представлены реконструированными значениями, а 1211 лет – данными инструментальных наблюдений.

По данным “Календаря последовательной смены ЭЦМ” была рассчитана средняя продолжительность действия ЭЦМ типов 13з и 13л за периоды 5, 10, 16, 20 и 25 лет [<http://www.atmospheric-circulation.ru>]. Затем определялись значения коэффициента корреляции продолжительности действия ЭЦМ 13з и ЭЦМ 13л со значениями аккумуляции и абляции за соответствующие периоды осреднения (5, 10, 15, 20, 25 лет). Полученные значения приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что увеличение продолжительности действия ЭЦМ типа 13з приводит к возрастанию аккумуляции (приходной составляющей баланса массы льда) в Скандинавии и на Кавказе и ее сокращению на Аляске и в Кордильерах.

Увеличение продолжительности действия ЭЦМ типа 13л приводит к возрастанию абляции (расходной составляющей баланса массы льда) на Канадском Арктическом архипелаге, в Кордильерах и Альпах и к ее сокращению на Аляске. Рассмотрим это подробнее.

Скандинавия в период действия ЭЦМ 13з оказывается на пути движущихся с Атлантики циклонов, приносящих осадки в осенне-зимний период (рис. 7). С ростом продолжительности действия ЭЦМ этого типа в течение столетия (см. рис. 3) связано увеличение приходной составляющей баланса массы льда (см. табл. 3). Это отражается в положительных значениях циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой баланса массы льда (см. табл. 2).

В период действия ЭЦМ 13л район Канадского Арктического архипелага оказывается в зоне Гонульского антициклона, погодные условия которого способствуют возрастанию абляции (см. рис. 7). Увеличение продолжительности действия ЭЦМ этого типа в XX в. [Кононова, 2009] определяет рост расходной составляющей баланса массы льда, что подтверждается отрицательными значениями циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой значений баланса массы льда (см. табл. 2).

Кордильеры в период действия ЭЦМ типа 13л находятся в районе действия Гонульского антициклона, способствующего возрастанию абляции – расходной составляющей баланса массы льда. В период действия ЭЦМ типа 13з район оказывается в зоне действия северо-американского антициклона, что приводит к сокращению аккумуляции – положительной составляющей баланса массы льда (см. табл. 3). Таким образом, увеличение продолжительности действия группы мери-

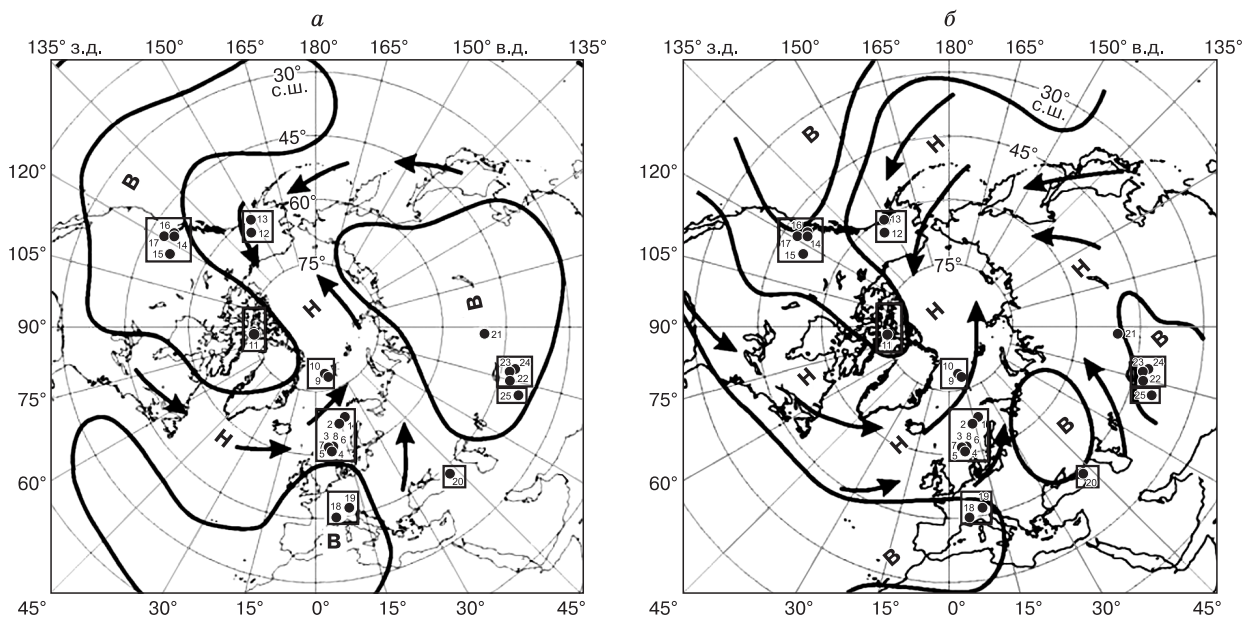


Рис. 7. Динамические схемы ЭЦМ типов 13з (а) и 13л (б) (по С.С. Савиной, Л.В. Хмелевской [1984]) с расположением исследуемых ледников и ледниковых районов как на рис. 1.

В – области высокого давления, Н – области низкого давления.

диональной южной циркуляции на протяжении XX в. (см. рис. 3) приводит к росту расходной составляющей и сокращению приходной, что проявляется в отрицательных значениях циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой баланса массы льда (см. табл. 2).

В период действия ЭЦМ 13з пути движения циклонов полярного фронта проходят южнее Аляски. Этим объясняются отрицательные связи динамики продолжительности ЭЦМ типа 13з с изменчивостью аккумуляции. В период действия ЭЦМ типа 13л Аляска находится на пути движения циклонов полярного фронта, что приводит к сокращению абляции и формированию отрицательных корреляционных связей в динамике продолжительности действия ЭЦМ типа 13л и динамике абляции (см. табл. 3). Следствием сочетания отмеченных факторов является формирование отрицательных значений циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой баланса массы льда (см. табл. 2).

Альпы в период действия ЭЦМ типа 13л находятся в зоне действия Азорского антициклона, формирующего условия, способствующие увеличению абляции – расходной составляющей баланса массы льда (см. табл. 3). Следствием увеличения продолжительности действия ЭЦМ этого типа в течение XX в. (см. рис. 3) является рост доли расходной составляющей в балансе массы ледников, что проявляется в отрицательных значениях циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой баланса массы льда (см. табл. 2).

На Кавказе в период действия ЭЦМ 13з происходят прорывы южных циклонов со Средиземного моря, вносящих положительный вклад в приходную составляющую баланса массы льда (см. рис. 7, табл. 3). Рост приходной части баланса массы льда на протяжении столетия происходит в связи с постоянным увеличением продолжительности действия ЭЦМ 13з (см. рис. 3). Это проявляется в положительных значениях циркуляционного индекса связи продолжительности действия группы меридиональной южной циркуляции с динамикой баланса массы льда (см. табл. 2).

## ВЫВОДЫ

На основе анализа данных макроциркуляционных реконструкций и инструментальных наблюдений баланса массы льда для девяти ледниковых районов Северного полушария на фоне общей деградации оледенения определена метакронность в динамике баланса массы льда, подтверждающая концепцию метакронности географических явлений и развития покровных чет-

вертичных оледенений, выдвинутую в 1960-х гг. К.К. Марковым [1965, 1986], и отмеченную В.М. Котляковым [1964, 2004] несинхронность для современного оледенения Земли.

Пространственная структура метакронности проявляется в существовании четырех групп, которые объединяют ледниковые районы с квазисинхронным изменением баланса массы льда.

Первая группа включает Скандинавию и Кавказ, вторая – Канадский Арктический архипелаг, Аляску, Кордильеры и Альпы, третья – Тянь-Шань и Памиро-Алай, четвертая – Шпицберген. То есть при осреднении значений баланса массы льда за пять и более лет отмечается сходная динамика баланса массы льда в Скандинавии и на Кавказе. Сходным образом происходит изменение массы льда в образующих вторую группу районах Канадского Арктического архипелага, Аляски, Кордильер и Альп. При этом динамика баланса массы льда в ледниковых районах первой группы характеризуется асинхронным изменением по отношению к динамике баланса массы льда в ледниковых районах второй группы. Сходным образом изменяется баланс массы льда в ледниковых районах Тянь-Шаня и Памиро-Алая. Отдельную группу образует ледниковый район Шпицбергена.

Исследование связи динамики баланса массы льда в ледниковых районах (и группах районов) с продолжительностью действия групп циркуляции позволило выявить следующие особенности.

1. Динамика баланса массы льда в Скандинавии и на Кавказе характеризуется тесными положительными корреляционными связями с продолжительностью действия группы меридиональной южной циркуляции и отрицательными – с продолжительностью действия группы нарушения зональности.

2. Динамика баланса массы льда в Канадском Арктическом архипелаге, на Аляске, в Кордильерах и Альпах, наоборот, характеризуется тесными положительными корреляционными связями с продолжительностью действия группы нарушения зональности и отрицательными – с продолжительностью действия группы меридиональной южной циркуляции. Обнаруженным характером связи динамики баланса массы льда с продолжительностью действия групп циркуляции объясняется асинхронное изменение баланса массы льда в первой и второй группах ледниковых районов.

3. Динамика баланса массы льда в районах с резко континентальным климатом (Тянь-Шаня и Памиро-Алая) не имеет четко выраженной связи с продолжительностью действия групп циркуляции (в отдельных диапазонах осреднения отмечается только положительная связь с продолжительностью действия группы меридиональной северной циркуляции).

4. Динамика баланса массы льда на Шпицбергене характеризуется тесной отрицательной корреляционной связью с продолжительностью действия группы меридиональной северной циркуляции.

Выявленная метахронность в динамике баланса массы льда для отдельных ледниковых районов Северного полушария, ее пространственно-временные особенности и причины определяются циркуляционными процессами в атмосфере: действием групп циркуляции, по-разному проявляющимся в различных ледниковых районах, и продолжительностью этого действия. В результате циркуляционный фактор не только связывает пространство ледников в пространстве с областями их питания [Бут, 1963; Кренке, 1963; Тушинский, Малиновская, 1973; Котляков, 2004], но и во многом определяет динамику баланса их массы во времени.

Автор выражает благодарность Н.К. Кононовой за предоставленные данные по динамике ЭЦМ и А.Н. Костину за помощь в разработке расчетных компьютерных программ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00744, 11-05-01134).

### Литература

- Бут И.В.** О соответствии между общей циркуляцией атмосферы и современным распределением ледников в северном полушарии // *Материалы гляциол. исслед.*, 1963, вып. 7, с. 57–65.
- Дзердзеевский Б.Л.** Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии // *Материалы метеорологических исследований*. М., Изд-во АН СССР, 1968, 240 с.
- Дзердзеевский Б.Л.** Общая циркуляция атмосферы и климат. М., Наука, 1973, 288 с.
- Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.** Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов. Л., Гидрометеиздат, 1946, 80 с.
- Дюргеров М.Б., Котляков В.М.** Баланс массы ледников как основа мониторинга и фонового прогноза ледникового стока // *Труды V Всесоюз. гидрологического съезда*. Л., Гидрометеиздат, 1987, т. 7, с. 17–31.
- Кононова Н.К.** Исследование многолетних колебаний циркуляции атмосферы северного полушария и их применение в гляциологии // *Материалы гляциол. исслед.*, 2003, вып. 95, с. 45–65.
- Кононова Н.К.** Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М., Воениздат, 2009, 372 с.
- Котляков В.М.** О причинах различных тенденций развития существующих ледников // *Материалы гляциол. исслед.*, 1964, вып. 10, с. 121–127.
- Котляков В.М.** Проблема баланса массы ледников и ее значение для гляциологии // *Материалы гляциол. исслед.*, 1986, вып. 57, с. 4–8.
- Котляков В.М.** Снежный покров и ледники Земли. М., Наука, 2004, 448 с.
- Котляков В.М., Шамин П.А.** Некоторые итоги и перспективы изучения баланса массы ледников // *Материалы гляциол. исслед.*, 1986, вып. 56, с. 179–193.
- Кренке А.Н.** Районирование ледников Арктики в связи с циркуляцией атмосферы // *Гляциол. исслед.*, 1963, № 9, с. 57–71.
- Марков К.К.** Пространство и время в географии // *Природа*, 1965, № 5, с. 56–61.
- Марков К.К.** Избранные труды. Проблемы общей физической географии и геоморфологии. М., Наука, 1986, 288 с.
- Савина С.С., Хмелевская Л.В.** Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // *Материалы метеорол. исслед.*, 1984, вып. 9, с. 146.
- Тушинский Г.К., Малиновская Н.М.** Гляциологическое районирование Земли // *Гляциол. исслед.*, 1973, № 24 (25), с. 7–14.
- Федоров В.М.** Макроциркуляционная модель реконструкции и прогноза динамики баланса массы субарктических ледников (на примере ледника Энгабреен) // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2007, № 3, с. 18–26.
- Федоров В.М.** Реконструкция динамики баланса массы арктических ледников в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // *Криосфера Земли*, 2009, т. XIII, № 3, с. 80–87.
- Dyurgerov M.B.** Glaciers mass balance and regime: Data of measurements and analysis. Colorado, Univ. Colorado, Inst. Arctic and Alpine Res., 2002, 273 p.
- Fluctuations of Glaciers (1959–1965).** Paris, IASH (ICSI) UNESCO, 1967, vol. I, 52 p.
- Fluctuations of Glaciers (1965–1970).** Paris, IASH (ICSI) UNESCO, 1973, vol. II, 357 p.
- Fluctuations of Glaciers (1970–1975).** Paris, IASH (ICSI) UNESCO, 1977, vol. III, 269 p.
- Fluctuations of Glaciers (1975–1980).** Paris, IASH (ICSI) UNESCO, 1985, vol. IV, 265 p.
- Fluctuations of Glaciers (1980–1985).** Paris, IASH (ICSI) UNESCO, 1988, vol. V, 290 p.
- Fluctuations of Glaciers (1985–1990).** Zurich, IANS (ICSI) – UNEP – UNESCO, 1993, vol. VI, 322 p.
- Fluctuations of Glaciers (1990–1995).** Zurich, IANS (ICSI) – UNEP – UNESCO, 1998, vol. VII, 296 p.
- Fluctuations of Glaciers (1995–2000).** Zurich, IANS (ICSI) – UNEP – UNESCO, 2005, vol. VIII, 288 p.
- Fluctuations of Glaciers (2000–2005).** Zurich, IANS (ICSI) – UNEP – UNESCO, 2008, vol. IX, 266 p.

Поступила в редакцию  
1 сентября 2010 г.