

ВНЕШНИЙ МАССООБМЕН ЛЕДНИКОВ АКТРУ: МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ, ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ

Ю.К. Нарожный

Томский государственный университет

Представлена методика наблюдений за составляющими баланса массы ледников Актру, выявлена степень их зависимости от климатических факторов, реконструировано балансовое состояние ледников до 1940 г. и показана тенденция его изменения за 60 лет.

Ледники Актру достаточно хорошо известны гляциологической общественности. Интерес к ним обусловлен прежде всего географическим положением – практически центр Евразийского континента – и, во-вторых, наличием длительного ряда непосредственных наблюдений по основным гляциогидроклиматическим параметрам, позволяющего судить о современных тенденциях динамики ледников в условиях глубоко континентальных районов. Для этих целей ледники Актру признаны опорными объектами в Сибири и включены в Мировую сеть мониторинга ледников.

Исследованиям внешнего массообмена, а также факторам его обуславливающим, в бассейне Актру посвящено достаточно много работ [3, 6, 9, 12, 15 и др.], охватывающих в целом период с 1957 г. и по настоящее время. На разных этапах исследования основной комплекс наблюдений в летний период на ледниках в целом сохранялся, однако по отдельным составляющим – главным образом по аккумуляции – в первые годы степень детальности наблюдений, а, соответственно, и точность оценок были приблизительными, полученными, в основном, расчетным путем без учета процессов, происходящих в фирновой области. С тех пор ряды наблюдений существенно удлинились и расширились, накоплен опыт измерений, обработки и обобщения полевых материалов. Это позволяет более качественно оценить составляющие баланса массы, а также выявить их зависимость от конкретных климатических условий как на современном этапе исследований (1962–1999 гг.), так и в предшествующие периоды.

Схема измерений составляющих баланса массы

Методика производства гляциологических работ включала в себя несколько этапов.

Измерения начинались с проведения снегомерных работ в период максимума снегонакопления, который отмечается в период устойчивого перехода среднесуточных температур воздуха в сторону положительных значений на высоте языков ледников.

В большинстве случаев этот перелом в Актру происходит довольно резко и со значительным скачком в абсолютном значении температуры. Это обстоятельство очень важно при определении даты максимума снегонакопления по всей площади ледников, вертикальная протяженность которых составляет от 500 до 1500 м. В этот период снегомерными работами охватывается основная площадь ледников по фиксирован-

ной на поверхности массовой сети продольных и поперечных профилей и абляционных реек (рис. 1), которые ежегодно контролируются в конце сезона таяния (либо подбуриваются, либо устанавливаются новые). Как правило, к этому моменту времени процессы перераспределения снега на ледниках Актру уже заканчиваются, повышенная влажность поверхности снега и наличие ветровых и радиационных корочек препятствуют возникновению метелевого пересотложения; снос снега лавинами с окружающих склонов также в основном завершается. В случае несовпадения даты максимума со снегомерными работами вводилась соответствующая поправка по данным временно действующих метеопостов и осадкомерных пунктов, а также визуальных наблюдений по сети реек.

Одновременно с производством снегомерных работ закладывалась серия шурфов, мощностью от 1 до 10 м, в которых изучались структурно-стратиграфические особенности снежно-фирновой толщи, фиксировались мощности годичных горизонтов с послойным измерением их плотности, температуры толщи и другие параметры. Для этих целей использовались также трещины и разломы. Весь комплекс работ повторялся в конце сезона таяния, который в среднем приходится на первую декаду сентября. Таким образом, внутреннее питание измерялось методом послойного определения плотности в начале и конце периода таяния с учетом поправки на оседание. Затем эти данные интерполировались на всю область питания по известным значениям мощности и длительности льдообразования толщи, которые картировались по всей площади областей питания в конце каждого балансового года по результатам съемок снежного остатка с контрольными отметками в трещинах и шурфах.

В течение летнего сезона, с периодичностью в 5 дней – на леднике Малый Актру и 10 дней – на Левом Актру и Водопадном, снимались величины таяния по сети абляционных реек. При этом картировалось положение снеговой границы и измерялась величина наложенного льда. Полученные результаты наносились на крупномасштабные карты (1 : 10000, 1 : 5000) и строились поля режимных характеристик.

Величина летней аккумуляции определялась следующим образом. В момент проведения снегомерных работ одновременно производили запуск наблюдений на временно действующих (в летний период) метеопостах – Водопадный (3050 м), Учитель (2950 м), язык (2400 м) и фирновая зона (3250 м) Малого Актру, где

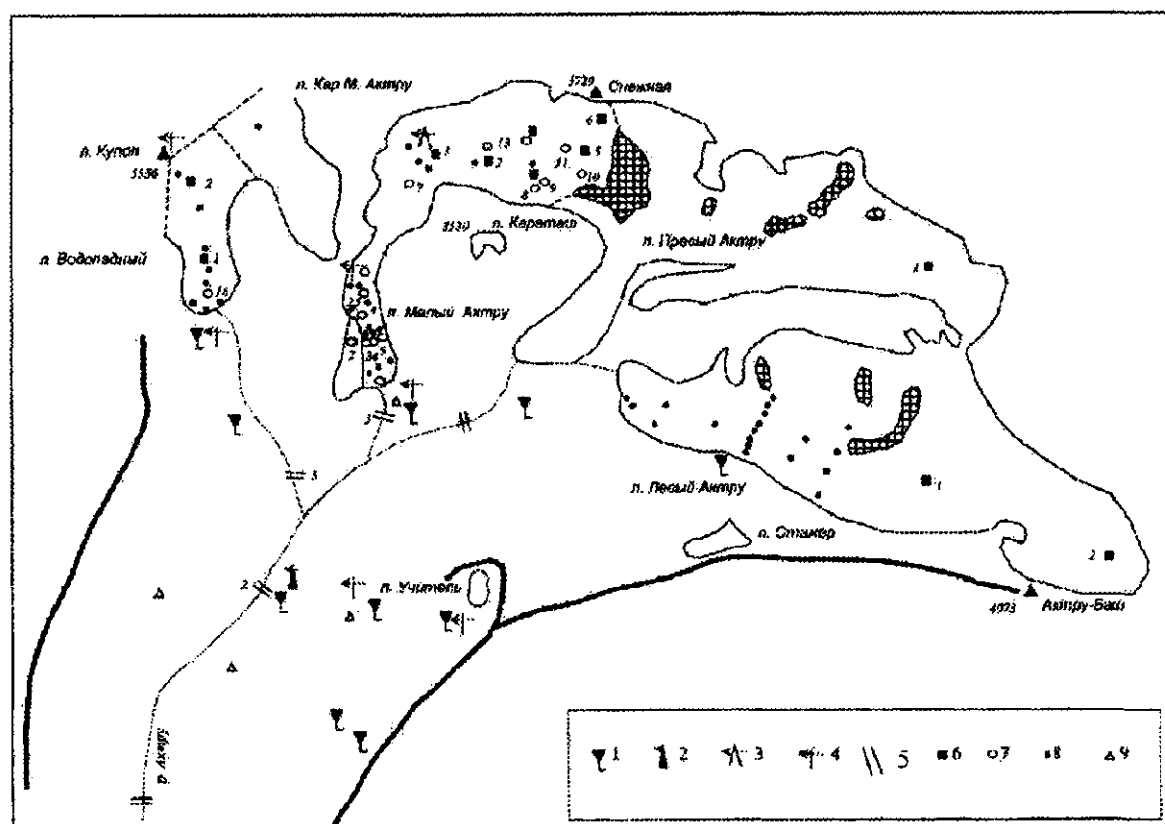


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений в бассейне Актру. (1 – суммарные осадкомеры; 2 – ГМС Актру; 3 – станция Верхний Актру; 4 – сезонные метеопункты; 5 – гидрологические створы; 6 – шурфы; 7 – термоскважины; 8 – абляционные рейки; 9 – мерлометры)

фиксируются суточные значения температуры воздуха и осадков (их вид и количество). Кроме того, по сети суммарных осадкомеров (11 шт.), равномерно распределенных от высоты 1950 до 3050 м, в конце каждого месяца снимались показания (рис. 1). По полученным значениям строили зависимость осадков от высоты местности, а по данным ГМС Актру (2150 м) и временным метеопостам подсчитывалось количество твердых осадков, которые интерполировались до верхних пределов оледенения. Кроме того, величина летних снегопадов контролировалась по абляционным рейкам, а в случае их большого количества (что нередко бывает) – проводились снегомерные работы.

Таким образом, при постановке массбалансовых наблюдений мы ориентировались на все имеющиеся в гляциологической практике схемы расчетов баланса массы, а именно [2]: по годовым значениям аккумуляции (С1) и абляции (А1); по зимнему (bw) и летнему (bs) балансам; по чистой аккумуляции (S + f) и чистой абляции (А1).

Процессы формирования баланса массы и его составляющих

Продолжительность периодов аккумуляции и таяния на ледниках Актру весьма существенно изменя-

ется по годам. Для определения границ этих периодов использовались данные по гидрометеостанции (ГМС) Актру и временнодействующим метеопунктам в бассейне (рис. 1).

За начало периода абляции принимается дата устойчивого перехода через 0°C средней суточной температуры воздуха на нижней границе ледников. Абляция льда начинается несколько позже, когда обнажается конец языка от сезонного снега. Окончание периода абляции (или начало нового балансового года) соответствует времени полного покрытия ледника устойчивым снежным покровом и переходом средней суточной температуры воздуха через 0°C в сторону отрицательных значений. Однако, в этот период, в последующие несколько дней, нередки возвраты тепла, которые, в целом, способны только увеличить влажность снежного покрова при отсутствии талого стока с ледника. Этот снег – начальная стадия формирования зимнего баланса массы ледника последующего балансового года.

Самое раннее начало таяния снега на леднике Малый Актру отмечено 13 апреля 1997 г., льда – 8 мая 1972 г., самое позднее – соответственно 29.05 (1987 и 1988 гг.) и 08.06 (1984 г.), в среднем за годы наблюдений – 14.05 и 27.05 (табл. 1). Окончание абляционного периода (или начало периода аккумуляции) заклю-

Таблица 1

Временные гравиты периодов аккумуляции и таяния и соответствующие им количество атмосферных осадков по ГМС Актуру

Год	Малый Актуру						Возледающий									
	Н	К	Д1	Д2	X1	X2	V/X2	C/X	Н	К	Д1	Д2	X1	X2	V/X2	C/X
1972	25.04(08.05)	08.09(15.09)	137(124)	-	243	-	-	-	01.06	20.08	81	-	143	-	-	-
1973	26.05(02.06)	08.09(18.09)	106(99)	259	233	326	2.02	1.61	02.06	22.08(01.09)	82	285	227	370	-	-
1974	12.05(20.05)	06.09(23.09)	118(110)	245	134	222	2.43	1.71	20.05	25.08	99	270	115	232	-	-
1975	27.05(04.06)	01.09(15.09)	98(90)	262	228	309	2.59	2.05	01.06	18.08(31.08)	79	279	197	320	-	-
1976	10.05(01.06)	01.09(14.09)	115(93)	250	355	224	3.84	2.00	01.06	30.08	91	286	298	304	-	-
1977	24.05(31.05)	06.09(21.09)	106(99)	264	317	264	3.00	1.90	31.05	26.08(30.08)	88	273	260	293	1.02	0.90
1978	16.05(01.06)	22.08(27.09)	99(83)	251	193	267	2.17	1.72	01.06	19.08	80	278	167	315	1.40	1.39
1979	15.05(23.05)	22.08(09.09)	100(92)	265	175	319	1.91	1.53	23.05	18.08	88	276	131	327	0.92	0.83
1980	07.05(24.05)	31.08(22.09)	117(100)	257	366	263	2.58	1.59	25.05	23.08(31.08)	91	279	313	332	0.93	0.88
1981	03.05(16.05)	30.08(27.09)	120(107)	244	280	200	2.70	1.58	17.05	13.08(29.08)	89	267	157	260	0.96	0.81
1982	30.04(18.05)	14.09(21.09)	138(120)	242	290	217	2.76	1.40	18.05	21.08	96	277	214	315	0.67	0.62
1983	14.05(05.06)	05.09(08.09)	115(93)	241	265	209	2.92	1.88	07.06	25.08	80	289	141	300	1.03	0.93
1984	12.05(08.06)	02.09(18.09)	114(87)	248	363	269	2.30	1.44	16.06	19.08(02.09)	65	294	240	376	0.93	1.02
1985	18.05(05.06)	04.09(03.10)	110(92)	257	263	230	2.56	1.72	18.06	14.08(31.08)	58	302	148	343	0.90	1.06
1986	17.05(05.06)	01.09(30.09)	108(89)	254	304	248	2.46	1.63	14.06	26.08	74	303	242	340	0.85	0.93
1987	29.05(05.06)	09.09(25.09)	104(97)	269	195	359	1.89	1.62	16.06	20.08(31.08)	66	293	124	409	0.73	0.94
1988	29.05(04.06)	13.09(25.09)	108(102)	261	279	413	1.89	1.68	10.06	25.08(03.09)	77	293	247	464	0.73	0.98
1989	12.05(26.05)	11.09(20.09)	123(109)	240	260	246	2.52	2.06	13.06	03.09	83	291	190	311	0.71	1.24
1990	03.05(20.05)	15.09	136(119)	233	309	306	2.22	1.72	07.06	20.08(03.09)	75	276	250	356	0.65	1.06
1991	09.05(11.05)	30.08(14.09)	114(112)	235	263	295	1.90	1.56	10.05	18.08	101	262	220	338	0.89	1.15
1992	15.05(23.05)	02.09(09.09)	111(103)	257	163	277	1.91	1.77	23.05	25.08	95	277	160	295	0.68	1.01
1993	21.05(28.05)	05.09(09.09)	108(101)	260	267	360	2.50	2.03	31.05	26.08	88	278	255	380	0.95	1.17
1994	05.05(25.05)	30.08(12.09)	118(98)	241	269	353	1.73	1.62	26.05	27.08	94	272	260	360	0.86	1.16
1995	28.05	27.08(04.09)	92	270	295	370	2.19	1.77	02.06	23.08	83	278	275	390	0.90	1.08
1996	21.05(06.06)	29.08(10.09)	101(85)	266	279	240	2.21	1.75	06.06	28.08	84	286	241	298	0.97	1.13
1997	13.04(15.05)	05.09(16.09)	146(114)	226	299	290	2.27	1.88	15.05	26.08	104	259	291	302	0.73	0.96
1998	09.05(13.05)	15.09(21.09)	130(126)	245	205	235	2.30	1.59	24.05	06.09	106	270	202	253	0.95	0.90
1999	20.05(03.06)	07.09(15.09)	111(97)	246	243	295	2.13	1.71	03.06	26.08(07.09)	85	269	230	308	0.84	1.08
Сред	14.05(27.05)	04.09(18.09)	114(102)	251	263	282	2.30	1.73	01.06	23.08	85	280	218	333	0.87	1.02

Примечание: Н – начало периода таяния (в скобках – начало таяния льда); К – конец периода таяния (в скобках – конец таяния льда); Д1 – длительность периода аккумуляции; Д2 – длительность периода аккумуляции; Х1 – осадки за период аккумуляции; Х2 – осадки за период аккумуляции; В/Х2 – отношение зимнего баланса к количеству зимних осадков; С/Х – отношение суммарной аккумуляции к величине годовых осадков

чено в отрезке времени с 22 августа по 15 сентября, в среднем – 4 сентября. Самый продолжительный период абляции снега составляет 146 дней (1997 г.), а льда – 126 дней (1998 г.); самый короткий период – соответственно 92 дня (1995 г.) и 83 дня (1978 г.).

Продолжительность балансового года в среднем многолетнем совпадает с календарным, но в отдельные годы может существенно отличаться от последнего – 350–380 дней. Его начало и окончание приходится в среднем на 4 сентября. Таким образом, для условий Алтая производство работ на ледниках из двух общепринятых в мире схем формирования баланса массы – стратиграфической и фиксированных дат [19] – приемлема только первая.

На плосковершинном леднике Водопадный разница в длительности периодов аккумуляции и таяния еще более значительна, чем на Малом Актру. Это связано, прежде всего, с его морфологическим типом и оклиматическими условиями существования, которые, в свою очередь, определяют режимные характеристики (аккумуляция, абляция) ледника, значительно отличающиеся от таковых для долинных ледников бассейна. Кроме того, конец языка располагается на 820 м выше, чем у Малого Актру. В силу этих особенностей, длительность периода абляции составляет 85 дней, изменяясь от 58 до 106 дней (табл. 1). Его начало датируется в среднем 01.06, с вариациями от 10.05 (1991 г.) до 18.06 (1985 г.). Соответственно, начало и окончание балансового года приходится в среднем на конец августа (23.08), при крайних значениях 13.08 (1981 г.) и 06.09 (1998 г.). При этом заметим, что разницы во времени между началом таяния снега и льда практически нет, т.к. в этот период на языке ледника, а также в отдельных местах фирновой области (особенно в предвершинной ее части), мощность снега не превышает 10–20 см, а иногда и вовсе наблюдаются обнаженные участки чистого льда. Исключение составляет осенний период (вторая половина августа), когда после интенсивных снегопадов, полностью покрывающих ледник, в последующие несколько дней в отдельные годы наблюдается таяние. Но, как правило, этот процесс протекает очень вяло, а абсолютные значения суточного таяния составляют всего несколько сантиметров и жидкий сток с ледника отсутствует. В результате, также как и на Малом Актру, этот фирнизированный снег «уходит» в следующий балансовый год.

Начало периода аккумуляции (конец августа – начало сентября), как правило, связано с серией мощных и интенсивных снегопадов, обусловленных выходом циклонов с Баренцева и Карского морей, а также со смещением северо-западных циклонов и формированием высотного циклона над Горным Алтаем [11, 15]. Окончательный период установления устойчивых отрицательных температур воздуха связан с формированием области повышенного давления в виде отрогов Азиатского (Монгольского) антициклона и проникновением холодного арктического воздуха в высокогорье Алтая.

По данным ГМС Актру, зимний сезон характеризуется незначительной повторяемостью осадков (30–45% от их общей продолжительности), но обильные снегопады (более 5 мм), дающие 40–70% всей суммы осадков, составляют лишь 8–20% от общего числа дней с осадками. Основное их количество за зиму выпадает в переходные сезоны года: сентябрь–октябрь – 31%, апрель–май – 33% и только 36% – за ноябрь–март.

В табл. 1 представлены данные по осадкам ГМС Актру за периоды аккумуляции, которые, как видим, для Малого Актру изменяются в пределах от 200 до 412 мм при среднем значении 282 мм. Для Водопадного эти величины составляют соответственно 253 и 464 мм (в среднем 333 мм). При этом отношение величины зимнего баланса массы (bw) на ледниках к количеству осадков за период аккумуляции изменяется на Малом Актру от 1,73 до 3,64, а в среднем на леднике за зиму концентрируется осадков в 2,3 раза больше, чем на метеостанции Актру. Напротив, на Водопадном это соотношение в среднем составляет 0,87, изменяясь от 0,65 до 1,40. Если рассматривать отношение суммарной аккумуляции (St) на ледниках к величине годовых осадков, то для Малого Актру оно равно в среднем 1,73, изменяясь от 1,4 до 2,06, для Водопадного – 1,02, изменяясь от 0,62 до 1,39.

Это значительное отличие между ледниками обусловлено следующими причинами: занимая северный и частично северо-западный склоны куполовидной вершины (3552 м), по высоте не уступающей основному гребню хребта Биш-Иирду, ледник Водопадный практически открыт для всех основных ветров; рельеф его поверхности имеет плавный уклон (в среднем 17°) в сторону долины Актру. Все это создает благоприятные условия для интенсивного сноса снега. Поэтому, зимний баланс ледника зависит, в основном, не от количества выпавших осадков, а от ветрового режима зимой. Коэффициент корреляции (R) между bw и X2 составляет всего лишь 0,41. Единственный вогнутый участок в центре ледника способствует концентрации тех незначительных запасов снега, которые, в основном, и определяют его зимний баланс.

Одна из основных особенностей режима оледенения бассейна Актру (как впрочем и всего Алтая) состоит в том, что аккумуляция на ледниках не заканчивается временем установления максимальных снегозапасов, накопленных за зиму, а продолжается и в летний период. Роль летних снегопадов в массообмене ледников Алтая отмечалось во многих работах [6, 9, 15, 17, 18 и др.]. Было выявлено, что доля летней аккумуляции возрастает от западной и северо-западной окраин горной страны вглубь, к центру и восточной окраине. В этом же направлении прослеживается и тенденция сокращения годовой суммы осадков от 2000 и более до 500 мм и менее. По данным ГМС Актру на три летних месяца (июнь–август) приходится 45% годовой суммы осадков, с вариациями от 34 до 54%. Однако, с ростом высоты в бассейне Актру внутриго-

довая структура распределения осадков значительно меняется. В табл. 2 представлены средние многолетние данные по суммарным осадкомерам, действующим с 1977 г. (рис. 1). Выявлено, что на фоне общей тенденции увеличения осадков с высотой за год (сентябрь-август), доля летних осадков возрастает от 45 до 68%. Вероятной причиной такого распределения является очень частый «разрыв» облачности над центром долины, что, в свое время, отмечал М.В. Тронов [18]. В холодное время года (сентябрь-март и сентябрь-май) распределение осадков (по абсолютной величине) в бассейне более менее равномерно, но летом происходит их увеличение по кривой, близкой к параболической: быстрое нарастание осадков прослеживается до высоты 2500–2700 м; далее с увеличением высоты их количество несколько уменьшается либо остается неизменным.

Соответственно, доля твердых осадков за июнь-август также возрастает с высотой. Многолетние данные по ГМС Актру и временнодействующим (в летний период) метеопостам в бассейне позволяют выявить следующее (табл. 2): на ГМС Актру доля твердых осадков составляет в среднем 14%, изменяясь в отдельные годы от 8 до 30%; у языка Малого Актру (2210 м) – 19%, с вариациями от 10 до 35%; на станции Учитель (2970 м) – 65%, изменяясь от 48 до 70 %; у языка ледника Водопадный (3040 м) – 83%, изменяясь от 75 до 90%. Экстраполируя эти данные до верхних пределов оледенения в бассейне, используя при этом методическую схему Г.Е. Глазырина [1], получаем, что на средней многолетней высоте границы питания на ледниках (3160 м) 92% летних осадков выпадает в твердом виде, а начиная с высоты 3300 м – почти 100%.

Распределение количества аккумулярованных осадков на ледниках Актру за снегопад имеет хорошо выраженную высотную зональность. При этом, если снегопад на языке ледника малоинтенсивен (до 3 мм), то в фирновой зоне накопление снега не превышает, как правило, 4–6 мм в слое воды. Такие снегопады наблюдаются наиболее часто – до 60% от их общего

числа за летний сезон. Повторяемость снегопадов средней интенсивности (3–10 мм) составляет около 30%. При этом, величина твердых осадков существенно возрастает с высотой: так, если на станции Актру регистрируется 10 мм, то на языке ледника Малый Актру выпадает 15–20 мм, а в фирновой зоне – до 30 мм. Еще более редки мощные снегопады (больше 10 мм) – всего 1–4 случая за сезон абляции, при которых различие в количестве выпадающих осадков между нижними и верхними частями ледников резко увеличивается. Так, за последние годы наблюдений в бассейне наиболее мощный снегопад был отмечен 13 августа 1989 г., при котором на станции Актру было зарегистрировано 20,5 мм осадков, на языке Малого Актру – 40–50 мм, а выше границы питания слой снега составил в среднем 50 см, что соответствует около 100 мм осадков.

В целом, сумма средних и мощных снегопадов дает около 70% летней аккумуляции на ледниках Актру, которая составляет для долинных ледников бассейна (Малый, Левый и Правый Актру) в среднем 28% от суммарной аккумуляции за год, изменяясь в разные годы от 11 до 42%; для плосковершинного ледника Водопадный – 48%, с вариациями от 21 до 64%.

На основании всех имеющихся гляциоклиматических данных установлены зависимости между количеством зимних (сентябрь-май) и годовых (сентябрь-август) осадков, регистрируемых на станции Актру, и аккумуляцией снега на ледниках бассейна, накопленного за зимний период и весь балансый год в целом (рис. 2). Как видим, для ледника Малый Актру эти связи довольно устойчивы (коэффициенты корреляции составляют соответственно 0,75 и 0,85), что, в свою очередь, позволяет использовать их при решении прямой и обратной задачи в системе гляциологического мониторинга. Для ледника Водопадный такие связи менее однозначны: в первом случае коэффициент корреляции равен всего лишь 0,41 (причины изложены выше); во-втором – $R = 0,77$, что обусловлено значительной долей летних осадков и летней аккумуляцией.

Таблица 2

Среднегодовое распределение осадков по высоте и сезонам года в бассейне Актру

№	Станция	Абс. Высота, м	Местоположение	Осадки за год (IX-VIII)	Доля осадков по сезонам (в % от годовых)			Доля твердых осадков, в % за VI-VIII
					IX-III	IV-V	VI-VIII	
1	ГМС Актру	2150	Гидрометеостанция	545	37	18	45	14
2	Мал. Актру	2210	У языка М. Актру	733	23	15	62	19
3	Бараньи лы	2430	Центр долины	713	22	17	61	
4	Ригель	2500	Левый склон	683	26	13	61	
5	Кулуар	2600	Правый склон	665	23	15	62	
6	Голубое озеро	2800	Боковая морена Левого Актру	623	25	18	57	
7	Учитель	2970	Левый водораздел	554	30	15	55	65
8	Водопадный	3040	В 100 м от языка Водопадного	670	19	13	68	83

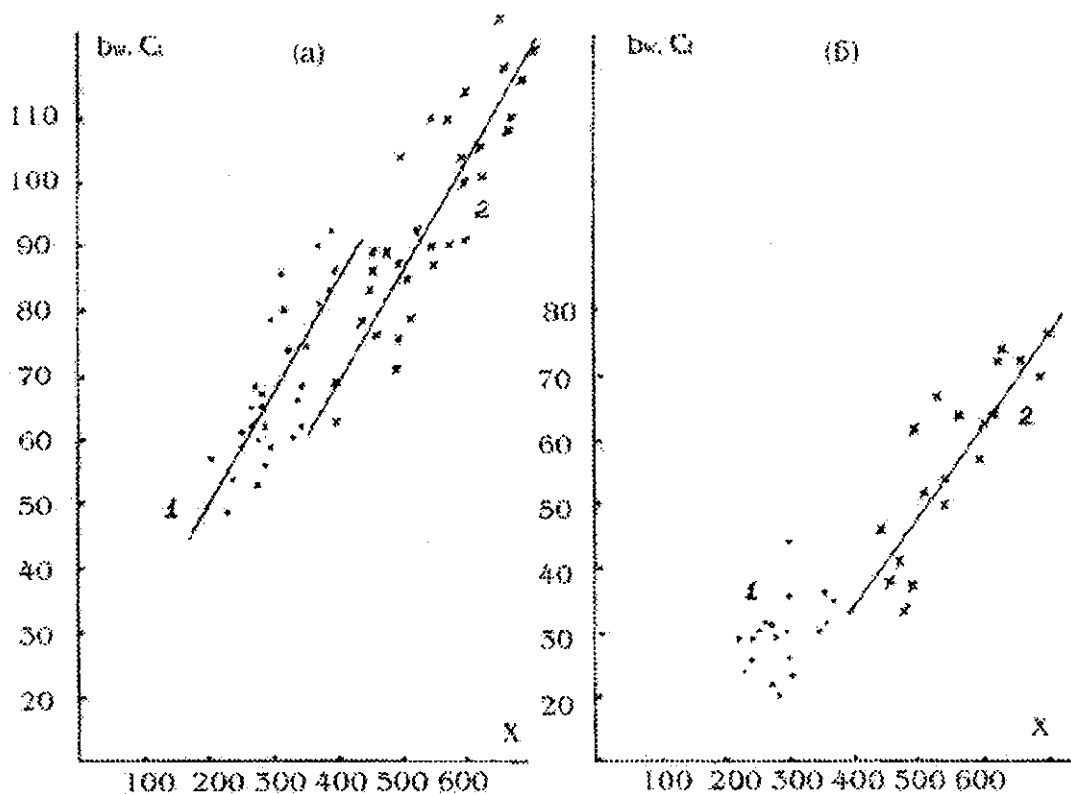


Рис. 2. Зависимость b_w (1) и C_i (2) на ледниках Малый Актру (а) и Водопадный (б) от количества зимних (сентябрь-май) и годовых (сентябрь-август) осадков, регистрируемых на ГМС Актру

Процессы таяния и факторы, их обуславливающие, на ледниках Актру изучены наиболее полно и всесторонне. Еще со времен МГГ – начала систематических и целенаправленных исследований ледников Актру – таяние рассматривалось как главный и интегральный показатель комплекса различных процессов состояния атмосферы и ледников. Различные аспекты этого вопроса обобщены в многотомной серии сборников «Гляциология Алтая» и нескольких монографиях [6, 15 и др.].

Регулярные наблюдения за поверхностной абляцией по сети рек на ледниках бассейна начали проводиться с 1956 г. и продолжаются по настоящее время [4, 6, 9, 13 и др.]. Было установлено, что величина летнего баланса массы обусловлена климатическими условиями конкретных лет, а его распределение по площади ледников зависит, в основном, от абсолютной высоты, экспозиции, степени экранированности склонами окружающих хребтов и заморенности поверхности льда. В общем случае распределение таяния по площади ледников выглядит следующим образом: на языках долинных ледников оно составляет в разные годы от 300 до 600 г/см², на высоте границы питания – от 75 до 220 г/см², выше – в средних частях фирновых зон – от 40 до 80 г/см², на склонах вершины Актру-Баши (более 4000 м) – 10–15 г/см². На леднике Водопадный – на языке – от 100 до 200 г/см², уменьшаясь в предвершинной части (выше 3500 м) до 20–60 г/см².

Средневзвешенные по площади величины таяния в каждый конкретный год достаточно хорошо коррелируются со среднелетними температурами воздуха

(июнь-август) на станции Актру (рис. 3). Однако, заметим, что с уменьшением температуры воздуха линейность связи нарушается: на леднике Водопадный это выражается в более значительном разбросе точек (рис. 3б), а на Малом Актру зависимость $A_t = F(t)$ вообще приобретает параболическую форму (рис. 3а). Основной причиной таких нарушений является тот факт, что с понижением температуры воздуха (обычно с 8,5°C и ниже) увеличивается повторяемость летних снегопадов и, соответственно, возрастает величина летней аккумуляции на ледниках. Наши исследования показывают [6, 8], что летние снегопады в области питания способны сохранить ледникам около 10–15%, а в зоне абляции – до 30–40% годовой массы льда. Таким образом, как неоднократно подчеркивал М.В. Тронов [17, 18 и др.], повторяемость летних снегопадов в условиях Алтая может быть решающим погодно-климатическим фактором, определяющим динамику ледников.

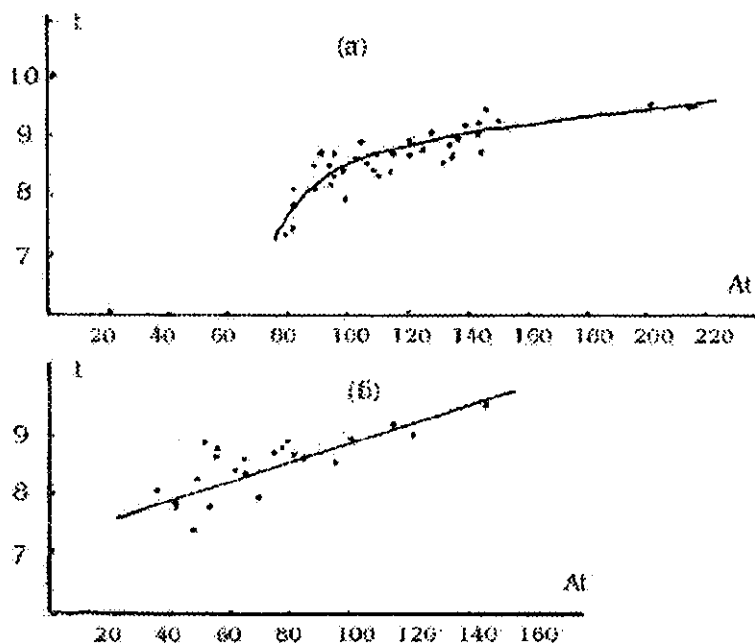
Для ледников Алтая очень важной составляющей их балансового состояния является величина внутреннего питания – или повторно замерзшая вода в пористых снежнофирновых отложениях (инфильтрационное льдообразование) и на поверхности льда (конгеляционное льдообразование). Измерения ее производились, как отмечено выше, в наиболее характерных точках областей питания ледников Актру в опорных шурфах путем сопоставления плотности и водности в

Рис. 3. Зависимость суммарного таяния (A) от среднелетней температуры воздуха (t) на ГМС Актру для ледников Малый Актру (а) и Водопадный (б)

последовательных годовых слоев в начале и конце периода таяния с учетом поправки на оседание. Основные закономерности интерполяции величины внутреннего питания (f) по площади ледников были исследованы в период 1981–1986 гг. [8, 10], когда только в зоне питания ледника Малый Актру было заложено 6 шурфов от 2 до 11 м, и 7 термоскважин до глубины 10–20 м (рис. 1).

В качестве примера в табл. 3 представлены измеренные величины внутреннего питания за 1981 г. по годовым остаткам в различных точках активного слоя ледников Актру. Заметим, что зональность процессов льдообразования, выделенная нами раньше [8, 10], представлена здесь типичным континентальным набором – холодная фирновая, фирново-ледяная и зона ледяного питания.

Анализ таблицы показывает, что при наличии фирнового остатка текущего балансового года (S) значительная часть суммарного внутреннего питания (f) сосредоточена именно в нем и равна f_1 . Кроме того, чем больше S , тем больше и относительная величина f_1 . Так, по мере роста мощности фирнового остатка текущего года (шурфы 2, 3, 5, 6) на леднике Малый Актру в пределах фирново-ледяной зоны величина f_1 составляет от 20 до 50% суммарной f . Для опорного шурфа № 3 при средней суммарной величине $f = 30 \text{ г/см}^2$, f_1 изменяется от 5 до 14 г/см^2 . Последующий процесс льдообразования за счет внутреннего питания по годовым слоям предшествующих лет (f_n) также имеет некоторые специфические особенности: на участках 2–3-метровой мощности фирна распределение (f) более менее однородно и составляет по 20–30% в слое, при 6–7 метрах и более ос-



новная масса f_n (до 20–30% от суммарной f) сосредоточена в слое, следующим за годовым остатком текущего года. В случае, если фирновый остаток текущего года незначителен или вовсе отсутствует (шурф № 2 на Левом Актру, табл. 3, рис. 1), то наибольшее количество вновь образовавшегося льда находится в первом годовом слое (до 50%) с последующим относительно равномерным его распределением.

Из табл. 3 также следует, что внутреннее питание на участках полного набора годовых слоев, занимающих основную площадь областей питания ледников Актру, сосредоточено в первых трех-четырех слоях, что соответствует 5–7 метрам фирновой толщи. Так, в шурфе № 4 (холодная фирновая зона) $f = 35 \text{ г/см}^2$ из которых 32 г/см^2 или 91% находится в годовых слоях 1978–1981 гг.; для шурфа № 3 (фирново-ледяная зона) – 83%. Таким образом, отмеченные 6–7-метровые мощности фирновой толщи могут служить той предельной глубиной шурфов, которые следует закладывать для определения величины внутреннего питания.

Таблица 3

Распределение величины внутреннего питания (числитель, г/см^2) и его доля (знаменатель, в %) по годовым остаткам в различных точках активного слоя ледников Актру в 1981 г. (см. рис. 1)

Годовой слой	Малый Актру					Водопад- ный, № 1	Правый Актру, № 1	Левый Актру, № 2
	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6			
1981	3,5/30	9,5/41	17/49	10,5/39	8,5/40	3,6/22	3,8/30	–
1980	2,5/22	6,5/29	8,0/23	8,5/32	6/29	5,4/34	3/23	7/51
1979	–	2,2/10	3/8	2,5/9	1,5/8	–	–	–
1978	–	1,5/6	4/11	1,5/6	2/9	–	–	3,1/22
1977	2/18	0,8/3	1/3	0,7/3	0,4/2	3/19	1,5/12	2,4/17
1976	3,5/30	1/4	0,8/2	1,5/6	0,9/4	4/23	2/16	1,3/10
1975	–	1,5/6	0,6/2	1,5/5	2/9	–	2,5/19	–
1974	–	–	0,6/2	–	–	–	–	–
Сумма	11,5	23,0	35,0	26,6	21,3	16,0	12,8	13,8

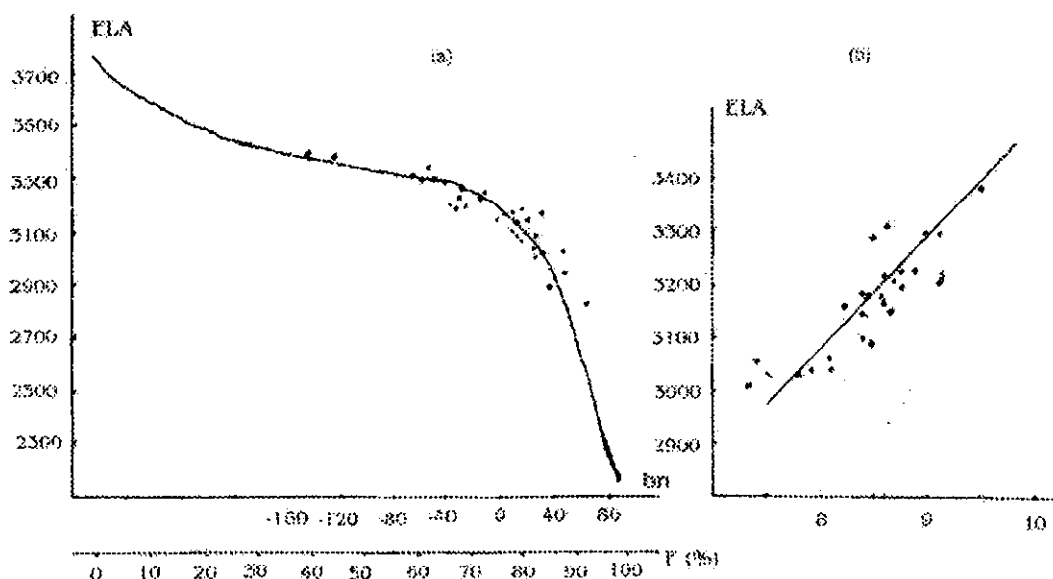


Рис. 4. Гипсографическая кривая и зависимость высоты границы питания от годового баланса массы (а) и от среднегодовой температуры воздуха (б) для ледника Малый Актру

Характер распределения суммарной величины внутреннего питания по площади ледников Актру выглядит следующим образом: нарастание f в пределах зоны ледяного питания (от 0 до 5–15 г/см²) к фирновой линии (на ледниках Водопадный и Кар Малого Актру до 20–30 г/см²) далее, вверх, сменяется ускоренным ростом в связи с быстрым утолщением многолетнего фирна и в пределах фирново-ледяной зоны изменяется от 8–15 до 30 г/см²; на нижней границе холодной фирновой зоны растущее внутреннее питание становится равным величине таяния, которое закономерно уменьшается с высотой от 40 до 20–10 г/см². В целом за годы наблюдений из общей суммы талых вод, образованных на ледниках Актру, потери на внутреннее питание составляют в среднем около 15%, изменяясь от 4 до 35%.

Таким образом, рассмотренные выше процессы формирования массбалансовых характеристик, определяющих бюджетное состояние ледников Актру, показывают, что составляющие баланса массы весьма чувствительны к климатическим изменениям и во многом от них зависят по абсолютным значениям.

Интегральным выражением гляциоклиматических процессов на ледниках служит положение высоты границы питания (ELA), определяемое в Актру балансовым методом. Диапазон колебания этой характеристики чрезвычайно велик: на Малом Актру – от 2800 до 3390 м (590 м); на Водопадном – от 3150 (нижний предел) до полного ее отсутствия на леднике (1998 г.). Кроме того, в отдельные годы (1979, 1982 и 1991 гг.) на Водопадном область питания наблюдалась только в виде незначительного пятна в центре ледника, составляющего от 9 до 22% от его общей площади.

В результате многолетних наблюдений на леднике Малый Актру получена связь между балансом массы (bn) и высотой границы питания (ELA), которая представлена в виде нелинейной функции и достаточно

хорошо описывается гипсографической кривой ледника (рис. 4а). Хотя линейная аппроксимация связи $bn = f(ELA)$ имеет достаточно высокий коэффициент корреляции, равный 0,86, но в экстремальные годы (при самом низком или высоком положении ELA) она дает ошибки до 20–30 г/см². Несколько предпочтительнее использовать для этих целей коэффициент AAR – доля области аккумуляции, о чем свидетельствует более высокий коэффициент корреляции, равный 0,91. Для остальных ледников бассейна также выявлены аналогичные закономерности. Таким образом, выполняется одно из основных условий применимости на Алтае известной имитационной модели М.Б. Дюргерова [5 и др.], предполагающей переход от данных, полученных на отдельно взятом леднике, к их группе или системе при помощи связи $bn = f(ELA)$ и распределения площади оледенения по высоте. В ближайшее время необходимо выяснить степень репрезентативности этих зависимостей для всего оледенения Алтая, либо каких-то отдельных его районов, с целью дальнейшего использования для расчета баланса массы и ледникового стока всей ледниковой системы в целом за каждый год.

Кроме того, получена связь высоты границы питания со средней летней температурой воздуха (t) на станции Актру (рис. 4б). Оказалось, что при отклонении летней температуры на $\pm 1^\circ\text{C}$ от нормы (за период 1957–2000 гг.) высота границы питания на Малом Актру изменится (поднимется или опустится) примерно на 180 м. Эта зависимость также дает возможность оценивать баланс массы и ледниковый сток при современном состоянии ледников и климата.

Аналитическое выражение наиболее статистически значимых зависимостей, рассмотренных выше, представлены в табл. 4. Они позволяют на количественном уровне проследить причинно-следственные связи в решении ряда основных вопросов взаимодействия климата и оледенения Алтая.

Таблица 4

Уравнения регрессии для определения режимных и климатических характеристик ледников Актру

№	Характеристика	Уравнение регрессии	Коэф-нт корреляции
1	Среднегодовая температура воздуха на ГМС Актру – ГМС Кара-Тюрек	$T_{\text{ак}} = 0,67T_{\text{кт}} + 4,74$	0,91
2	Суммарное таяние на Малом Актру – среднегодовая температура на ГМС Актру	$At = 1635 - 407,4T + 26,7T^2$	0,87
3	Абляция – среднегодовая температура воздуха (там же)	$At - f = 1874 - 474,7T + 31,1T^2$	0,93
4	Годовой баланс массы Малого Актру – суммарное таяние	$Bn = 145 - 1,31At$	-0,89
5	Годовой баланс массы Малого Актру - абляция	$Bn = 113 - 1,21(At - f)$	-0,94
6	Годовой баланс массы Малого Актру – высота границы питания	$Bn = 1009 - 0,321 ELA$	-0,86
7	Суммарная аккумуляция на Малом Актру – осадки за сентябрь-август на ГМС Актру	$Ct = 1,3 + 0,171X_{9,8}$	0,85
8	Зимний баланс Малого Актру – осадки за сентябрь-май на ГМС Актру	$Bw = 17,6 + 0,164X_{9,5}$	0,75
9	Суммарная аккумуляция на Водопадном – осадки за сентябрь-август на ГМС Актру	$Ct = -23 + 0,143X_{9,8}$	0,77
10	Годовой баланс массы Водопадного - абляция	$Bn = 54,7 - 0,98(At - f)$	-0,81
11	Годовой баланс массы Водопадного – высота границы питания	$Bn = 1172 - 0,366ELA$	-0,88

Также эти зависимости можно использовать при реконструкции баланса массы ледников Актру за длительный период времени, что позволит оценить влияние разных факторов на изменение состояния оледенения и реакцию на колебания климата. Ранее такая реконструкция была нами сделана за 147-летний период (1839–1985 гг.) по двухступенчатой связи: метеозвенья (температура, осадки) станция Барнаул – станция Актру – режимные характеристики ледника Малый Актру [7]. Мы вновь решили вернуться к этой проблеме по следующим причинам: 1) значительно увеличился период непосредственных наблюдений на ледниках (на 15 лет), что позволяет выявить более статистически значимые зависимости; 2) выявлены более надежные связи между метеопараметрами по станциям Актру и Кара-Тюрек, действующей с 1940 г.; 3) в качестве решающего аргумента при реконструкции использовалась важная особенность массообмена ледников Актру, которая заключается в том, что изменчивость годового баланса массы определяется, в основном, изменчивостью летнего баланса массы. Так, в колебаниях b_n за период 1962–2000 гг. прослеживается четкая синхронность с величиной At при $R = 0,89$, а еще лучше – с $(At - f)$ при $R = 0,94$.

Основная схема расчета при реконструкции до 1940 г. сводилась к следующему: по зависимости 1 (табл. 4) вычислялась средняя летняя температура воздуха на станции Актру за период 1940–1956 гг.; затем определялась величина At и $At - f$ по уравнениям 2 и 3; по формулам 4 и 5 вычисляли годовой баланс массы; Ct определялось как остаточный член уравнения; ELA – по зависимости 6. Как отмечалось выше, в период 1956–1961 гг. проводились наблюдения за величиной At [13], хотя и не с такой частотой точек измерений, как того требуют современные методические рекомендации по наблюдениям за ледниками. Тем не менее, мы использовали эти данные, взяв за основу выявленные нами за много лет закономерности распределения величины At по площади ледников. Кроме того, за этот же период известны температура воздуха и количество осадков [16]. Поэтому, для опреде-

ления Ct за период 1956–1961 гг. дополнительно использовалась зависимость 7 (табл. 4).

Результаты расчета годового баланса массы и его составляющих для ледника Малый Актру представлены в табл. 5, где с 1962 г. – данные непосредственных наблюдений. Расчет параметров на независимом материале (1962–1999 гг.) показал, что ошибка в определении At не превышает 15%, а Ct – 10%. Сравнение с предыдущей реконструкцией [7] показывает, что направленность тенденций годового баланса массы и его составляющих сохраняется, а в отдельные годы даже совпадает по абсолютным значениям.

Основные закономерности балансового состояния и факторов его обуславливающих для ледника Малый актру за период 1940–1999 гг. сводятся к следующему (рис. 5, табл. 5).

1. В межгодовой изменчивости годового баланса массы выделяется несколько периодов накопления или потери массы льда: первые отмечаются в 1946–1949, 1956–1960, 1967–1973, 1975–1977 и 1983–1990 гг., а вторые – в 1940–1945, 1950–1955, 1961–1966, 1978–1982 и 1991–1999 гг. При этом, длительность этих периодов составляет 6–9 лет. Аномально положительные проявления баланса массы наблюдаются через 9–12 лет, а аномально отрицательные – через 20–22 года. Более четкая цикличность в колебаниях b_n прослеживается в его сглаженных по 5-летиям значениях. Так, смена направленности тенденций происходит через 6 лет, а полный цикл колебаний, включающий фазу подъема и фазу спада b_n , составляет 11–12 лет. Общий дефицит массы ледника за 60 лет составил 620 см в слое воды.

2. В колебаниях составляющих баланса массы (Ct и At) прослеживается аналогичная цикличность. Однако в последние два десятилетия межгодовая структура формирования баланса массы несколько изменилась. Так, если до начала 1980-х годов в межгодовых колебаниях Ct и At прослеживается четкая асинхронность, то после этого периода происходит одновременное увеличение обеих составляющих, причем, рост At более интенсивен. Вероятной причиной таких тенденций в поведении ледников является общее глобаль-

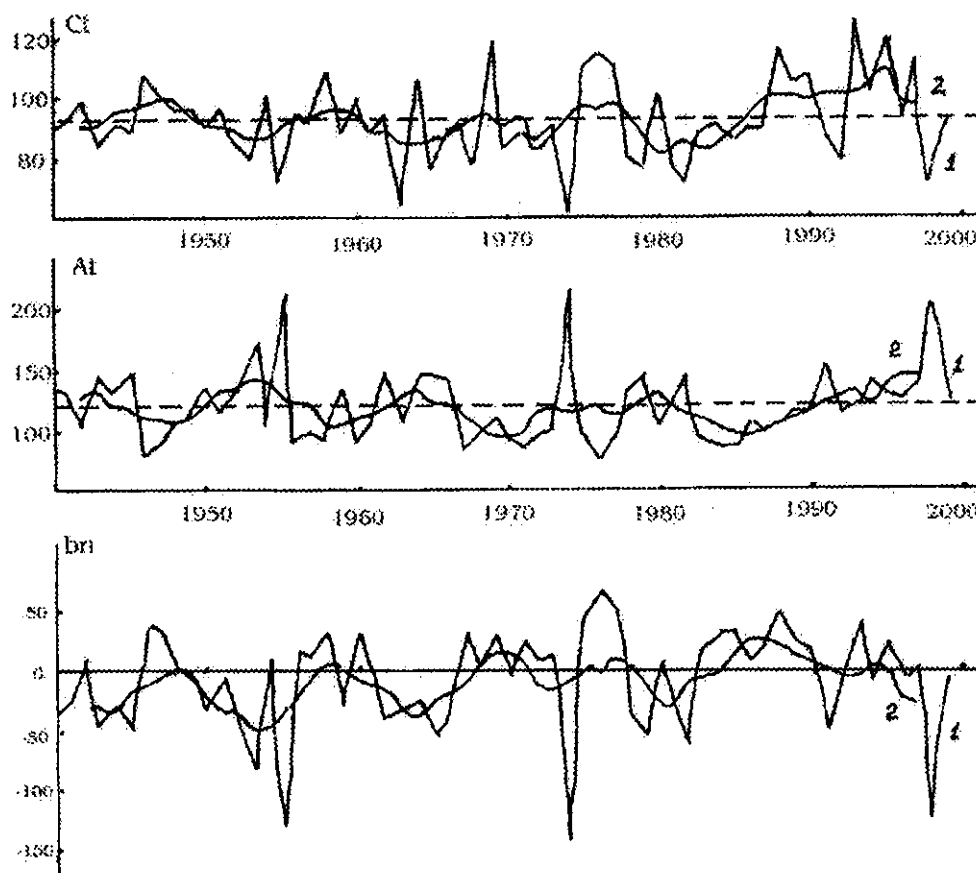


Рис. 5. Годовой ход суммарной аккумуляции (С), таяния (А) и баланса массы (b) Ледника Малый Актру за 1940–1999 гг. (1 – ежегодные значения, 2 – осредненные по 5-летиям)

ное изменение климатической системы планеты в целом. Начавшееся потепление в середине 1970-х годов отразилось на режимных характеристиках ледников. Так, проведенные нами исследования показывают [14], что на всей территории Горного Алтая наблюдается значимый рост среднегодовых температур воздуха. В высокогорье увеличение температуры наблюдается во все сезоны года, кроме осени, но наиболее интенсивно теплеет в холодный период (ноябрь–март), что привело к увеличению среднесезонной температуры воздуха на $2,1^{\circ}\text{C}$. Кроме того, потепление оказало влияние на режим выпадения осадков – их общее количество и внутригодовую структуру распределения: выявлен рост годовой суммы осадков за счет их увеличения в холодный период года, особенно в весенний сезон (апрель–май). Это, с одной стороны, привело к повышению значений зимнего баланса массы, с другой, является свидетельством усиления над Горным Алтаем зональной формы циркуляционных процессов.

3. На фоне общей тенденции прогрессирующего потепления климата в регионе, а, соответственно, и усиливающейся деградации оледенения, за последние десятилетия участились случаи аномального проявления значений годового баланса массы и его составляющих. Так, только за инструментальный период выявлено (рис. 5, табл. 5), что b_n меняется от $+68$ до -147 г/см^2 , C_t – от 61 (1974 г.) до 127 г/см^2 (1993 г.), A_t – от 73

(1976 г.) до 216 г/см^2 (1974, 1998 гг.). Кроме того, в отдельные годы существенно меняется внутригодовая структура формирования годового баланса массы. В одном случае – значительный сдвиг начала таяния на более ранний срок (табл. 1) – 09.05.1991, 13.04.1997, 09.05.1998 гг. При этом ледники, как правило, испытывают значительный, а иногда и катастрофический, дефицит массы. В другом случае, когда начало периода абляции сдвигается на более поздний срок – первая декада июня (табл. 1), годовой баланс массы ледников, даже несмотря на дефицит аккумуляции снега (что нередко бывает, табл. 5), близок к нулю либо принимает существенные положительные значения.

В заключение отметим, что динамика внешнего массообмена ледников Актру находится в достаточно хорошем соответствии с тенденциями климатических изменений региона. Это, в свою очередь, позволяет осуществлять программу как непосредственно гляциологического мониторинга, так и, решая обратную задачу, – климатического мониторинга. Поэтому, в условиях постоянно сокращающейся сети метеостанций на Алтае (особенно в высокогорье), крайне важно продолжать начатые в 1957 г. ежегодные наблюдения на ледниках Актру за балансом массы и его составляющими.

Работа выполнена при поддержке гранта Р98Сибирь (проект N98-05-03167) и гранта РФФИ № 01-05-65151.

Таблица 5

Баланс массы и его составляющие для ледника Малый Актру за период 1940–1999 гг.

Годы	Ct	At	At-f	bn	ELA	Σbn	Годы	Ct	At	At-f	bn	ELA	Σbn
1940	90	138	126	-36	3255	-36	1971	88	83	63	25	3040	-448
1941	93	132	120	-27	3230	-63	1972	86	96	79	7	3160	-441
1942	100	102	88	12	3110	-51	1973	90	99	80	10	3150	-431
1943	84	146	130	-46	3285	-97	1974	61	216	208	-147	3380	-578
1944	92	132	120	-28	3230	-125	1975	110	95	70	40	2900	-538
1945	89	151	139	-50	3300	-175	1976	114	73	46	68	2850	-470
1946	108	81	69	39	3020	-136	1977	110	89	61	49	2960	-421
1947	103	89	75	28	3055	-108	1978	79	133	120	-41	3290	-462
1948	96	105	89	7	3120	-101	1979	76	144	134	-58	3300	-520
1949	96	116	103	-7	3165	-108	1980	100	105	89	11	3100	-509
1950	90	137	125	-35	3250	-143	1981	76	121	107	-31	3220	-540
1951	96	116	103	-7	3165	-150	1982	71	146	137	-66	3310	-606
1952	85	132	120	-35	3250	-185	1983	89	89	74	15	3060	-591
1953	80	173	164	-84	3350	-269	1984	91	82	60	31	3030	-560
1954	100	102	89	11	3110	-258	1985	85	82	61	24	3060	-536
1955	72	212	206	-134	3390	-392	1986	90	104	86	4	3170	-532
1956	92	92	78	14	3100	-378	1987	90	95	73	17	3140	-515
1957	94	98	84	10	3110	-368	1988	116	100	69	47	3040	-468
1958	108	90	78	30	3050	-338	1989	104	111	82	22	3150	-446
1959	87	134	122	-35	3250	-373	1990	106	115	93	13	3180	-433
1960	100	89	68	32	3040	-341	1991	87	152	141	-54	3340	-487
1961	89	105	93	-4	3155	-345	1992	78	110	95	-17	3230	-504
1962	93	147	133	-40	3220	-385	1993	127	117	93	34	3180	-470
1963	63	105	97	-34	3180	-419	1994	101	138	116	-15	3230	-485
1964	105	145	133	-28	3190	-447	1995	118	127	100	18	3200	-467
1965	76	142	132	-56	3300	-503	1996	91	121	104	-13	3220	-480
1966	89	140	127	-38	3190	-541	1997	111	136	116	-5	3220	-485
1967	92	81	63	29	3010	-512	1998	70	202	193	-123	3390	-608
1968	78	96	80	-2	3150	-514	1999	92	116	103	-11	3210	-619
1969	118	109	89	29	3100	-485							
1970	83	90	71	12	3090	-473	Сред	92	119	102	-10	3170	

Литература

1. Глазырин Г.Е. Фазовый состав осадков в горах в зависимости от приземных температур воздуха // Метеорология и гидрология. 1970. № 1. С. 30–34.
2. Гляциологический словарь. Под ред. В.М. Котлякова. Л.: ГИМИЗ. 1984. 527 с.
3. Душкин М.А. Вещественный баланс ледника Малый Актру // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ. Вып. 14. 1978. С. 91–101.
4. Душкин М.А., Олейник И.Я. Абляция ледников Актру и ее зависимость от положительных температур воздуха // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1967. Вып. 5. С. 22–41.
5. Дюртегов М.Б. Мониторинг баланса массы горных ледников. М.: Наука, 1993. 127 с.
6. Ледники Актру (Алтай). Л.: ГИМИЗ, 1987. 120 с.
7. Нарожный Ю.К. Реконструкция баланса массы и условий льдообразования ледника Малый Актру за 150 лет // Гляциология Сибири. Томск: Изд-во ТГУ. 1986. Вып. 3(18). 1986. С. 85–104.
8. Нарожный Ю.К. Формирование зон льдообразования и стока с областей питания ледников Центрального Алтая в связи с изменениями климата. Автореф. дисс... канд. геогр. наук. Москва. 1988. 19 с.
9. Нарожный Ю.К. Баланс массы ледников Алтая и их климатическая обусловленность. МГИ. Москва. 1991. Вып. 72. С. 107–116.
10. Нарожный Ю.К. Особенности формирования жидкого стока с областей питания ледников Актру // Гляциология Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. Вып. 4(19). С. 103–119.
11. Нарожная О.В., Нарожный Ю.К., Попова К.И. Циркуляционный режим и гидротермические условия зим Алтая // Гляциология Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. Вып. 4(19). С. 182–198.
12. Окишев П.А. Некоторые данные о вещественном балансе и динамике ледников Актру // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1964. Вып. 3. С. 142–155.
13. Олейник И.Я. Сводные данные об абляции ледников Актру в 1956–1963 гг. // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1965. Вып. 4. С. 190–198.
14. Паромов В.В., Нарожный Ю.К., Нарожная О.В. Тенденция современных изменений приземной температуры воздуха и атмосферных осадков на юге Западной Сибири // Вопросы географии Сибири. Томск. 1999. Вып. 23. С. 124–140.
15. Ревякин В.С., Галахов В.П., Голещихин В.П. Горноледниковые бассейны Алтая. Томск. Изд-во ТГУ, 1979. 308 с.
16. Трифонова Л.И., Федюшина Л.П. К вопросу о приведении температуры и осадков станции Нижняя Актру к многолетнему ряду // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1965. Вып. 4. С. 255–270.
17. Тронов М.В. О влиянии летних снегопадов на режим ледников Алтая // Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1962. Вып. 1. С. 161–168.
18. Тронов М.В. Проблема гляциоклиматических показателей. Томск. Изд-во ТГУ, 1978. 168 с.
19. Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins, a guide to measurement and date computation // Technical Papers in Hydrology. UNESCO. 5. Paris. 1970. 20 p.