

УДК 551.32

**БАЛАНС И КИНЕМАТИКА МАССЫ ЛЕДНИКОВ ТЯНЬ-ШАНЯ НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА ТУЮКСУ**

Канд. геогр. наук К.Г. Макаревич

*На основе многолетних наблюдений рассматривается эволюция гляциосферы региона с короткими комментариями к фактическим данным.*

Известно, что изменения режима ледников оценивается по нескольким показателям, как: 1 – баланс массы (самый весомый среди других), 2 – колебания фронта (длины) ледников, 3 – изменения высоты поверхности (толщины льда), 4 – изменения площади и объёма ледника, 5 – колебания скорости движения льда. Поскольку изменения баланса массы по-существу является следствием влияния климатических причин, то остальные показатели колебаний ледников являются следствием колебаний баланса массы. В связи с причинами климатического характера находится и внутренний массообмен ледников, выраженный изменениями кинематических параметров движущейся массы льда.

Ледник Центральный Туюксу (сокращенно Туюксу) является представительным для Тянь-Шанского региона. Он надёжно отражает сокращение гляциосферы на обширных пространствах гор Центральной Азии, ледники которой в подавляющем большинстве мало отличаются от ледника Туюксу по режиму и другим гляциологическим характеристикам.

Ледник Туюксу залегает в верховьях реки Малой Алматинки на северном склоне Заилийского Алатау в диапазоне высот 4219...3436 м с координатами 43°03' с.ш. и 77°05' в.д.

Сорок лет назад ледник оканчивался на высоте 3373 м, а еще раньше, в 1937 г. – 3369 м. Длина открытой части ледника в 1958 г. достигала 3,4 км, в 2000 г. 2,84 км. Среднее за период годовое отступление фронта языка составило 8,5 м. Эта величина равна среднему годовому отступанию всех ледников северных склонов Заилийского и Кунгей Алатау за 1955...1990 гг. На рис.1 представлена сумма годовых изменений длины ледника Туюксу за 1923...2000 гг. Отступая, ледник оставлял перед собой постоянно увеличивавшуюся котловину, заполнявшуюся тальми водами. В 1973 г. они вырвались из озерной ванны, образовали грандиозный гря-

зекаменный поток, который был остановлен благодаря искусственно созданной плотине в урочище Медео, спасшей Алма-Ату от разрушения.

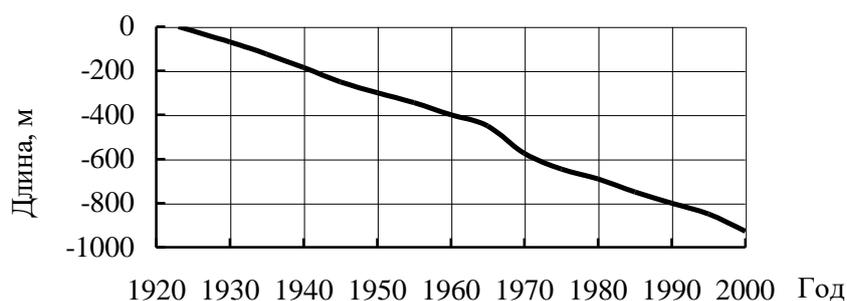


Рис. 1. Изменение длины ледника Туюксу за 1923...2000 гг.

С уменьшением длины ледника сокращалась и его площадь. В 1953 г. она равнялась 3,47 км<sup>2</sup>, в 1958 – 3,14, в 1998 – 2,62, а к 2000 г. уменьшилась до 2,54 км<sup>2</sup> или почти на 27 %. Ледники северных склонов хребта за период с 1955 по 1990 г. сократились в площади на 29 %, на такую же величину уменьшилась площадь ледников северного склона Кунгей Алатау. Темпы сокращения площади ледников в обоих хребтах одинаковы – 0,8 % в год. Сокращение площади сопровождалось понижением поверхности ледника и уменьшением объёма заключенного в нем льда: от 0,173 км<sup>3</sup> в 1958 г. до 0,137 км<sup>3</sup> в 1998 г. Разность между этими показателями в 36 млн. м<sup>3</sup> определена на основе стереофотограмметрических съёмок и карт 1958 и 1998 гг., выполненных немецкими геодезистами ГДР и ФРГ. Относительное сокращение объёмов льда в хребтах, упомянутых выше, за период 1955...1990 гг. составило 31...32 % и годовая убыль льда достигла 0,9 %. Изменение объёмов льда в достаточно удаленном от северных хребтов массиве Ак-Шыйрак, приведенные к одному периоду, мало отличаются от изменения объёмов льда в Заилийском Алатау.

Приведенная выше информация убедительно свидетельствует: о негативных изменениях морфометрических характеристик как ледника Туюксу, так и практически всех ледников региона. Если количественные показатели всех параметров колебаний по отдельным ледникам Тянь-Шаня и отличаются друг от друга, то всюду ярко выражена тенденция устойчивого сокращения длины, площади и объёма льда всех ледников, нарушаемая редкими и не часто повторяющимися пульсациями.

**Баланс массы.** Как уже было отмечено выше, от баланса массы зависят изменения геометрических параметров ледников. В этом контексте ледник Туюксу является наглядным примером. Баланс массы ледника изучается

с 1956 г и по настоящее время и по продолжительности ряда входит в число первых десяти ледников мира. Для наблюдений за зимней и летней аккумуляцией и абляцией снега и льда применялась стандартная методика.

Ледник был покрыт сетью из 130...159 и более рек, а также снегомерными шурфами и маршрутами. Положение рек ежегодно фиксировалось геодезическими привязками, а шурфы и точки измерений на маршрутах наносились на карты глазомерно. Снегомерные работы проводились на водоразделе задней стены цирка и на относительно безопасных участках – склонах области питания. Геодезическими измерениями была охвачена область абляции вплоть до границы питания. На основе многочисленных гляциологических и геодезических измерений строились поля составляющих баланса массы и кинематики поверхности и по ним определялись их количественные характеристики. Плотная речная сеть позволяла с большой точностью фиксировать движение снеговой линии по леднику, часто осложняемое летними снегопадами, и следить за текущим балансом массы. Таким образом, на основе прямых наблюдений были получены достоверные данные о режиме ледника; а в совокупности с синхронными наблюдениями на других ледниках оценить его репрезентативность по отношению к другим ледникам Тяньшанского региона.

Во многих публикациях по леднику Туюксу подробно описаны вопросы методики измерений, приведены фактические данные; по всем составляющим баланса массы и сопоставления их с результатами наблюдений на других ледниках региона и т.д. В них также дается анализ влияния климатических факторов на современную эволюцию оледенения. Баланс массы ледника Туюксу, как и других ледников Тянь-Шаня, имел в непосредственно исследуемый период явно негативную тенденцию, сначала довольно умеренную, а затем весьма активную. Это хорошо видно из представленных здесь графиков хода баланса массы ледника за период с 1957 по 2001 гг. (рис. 2, 3).

На нем четко прослеживаются переход к указанной тенденции. Он приходится на 1972/73 балансовый год. До этого ледник в течение 8 из 16 лет имел положительный баланс и тем самым отчасти восстанавливал свои потери при отрицательных балансах других восьми лет. Средняя величина положительного баланса за 8 лет равнялась  $25 \text{ г/см}^2$ , отрицательного баланса за остальные годы –  $39 \text{ г/см}^2$ , а в среднем за 16 лет баланс составил  $-7 \text{ г/см}^2$ . Характерно, что положительный баланс повторялся через один – четыре года. После 1973 г. ход баланса массы резко изменился по

сравнению с умеренным периодом. Положительный баланс стал редкостью и повторялся через 9...11 лет. За период с 1973 по 2000 г., т.е. за 9 лет положительный баланс наблюдался два года (1981...1993гг.) и в сумме достиг всего лишь 71 г/см<sup>2</sup>. За все остальные годы активного ухудшения баланса господствовали отрицательные показатели, средняя величина которых составила 64 г/см<sup>2</sup>. Средний за 29 лет баланс равнялся -57 г/см<sup>2</sup>, что в восемь раз превысило средний баланс в период умеренной тенденции. В целом же за период с 1956/57 по 2000/01 балансовые годы баланс массы опустился до -39 г/см, при этом только 10 лет наблюдался положительный баланс и в течение 35 лет отрицательный с экстремальными значениями от +60 до -148 г/см<sup>2</sup> [3, 4, 6, 7, 9, 11]. Самые высокие величины отрицательного баланса наблюдались во втором периоде (-110, -125, -147, -148 г/см<sup>2</sup>), тогда как в первом они не опускались ниже -78 г/см.

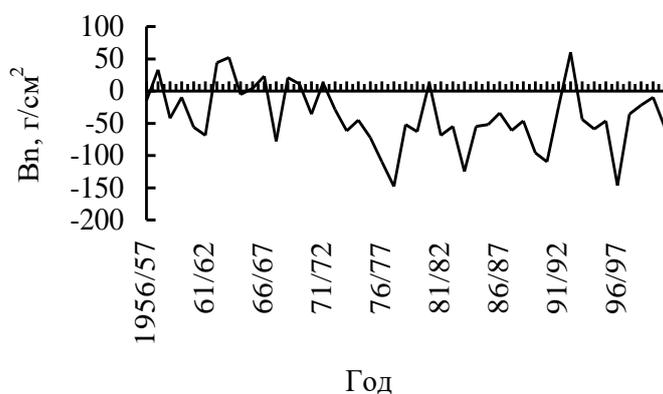


Рис. 2. Многолетний ход баланса массы ледника Центральный Туюксу.

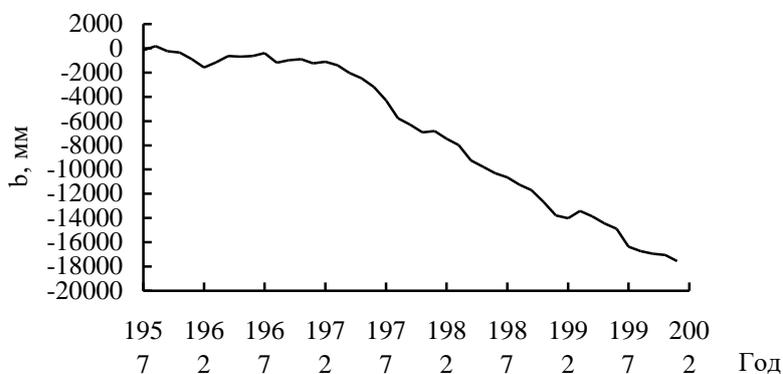


Рис. 3. Кумулятивный баланс массы ледника Туюксу, 1957...2001 гг.

Высоты границы питания, отождествляемые с фирновой линией, в указанные периоды эволюции ледника существенно отличались. Средняя высота в 1957...1972 гг. равнялась 3760 м, в 1973...2001 гг. 3860 м с экстремальными величинами соответственно периодам 3670...3800 и 3630...4219 м. С подъёмом границы питания в течение 30 лет значительно увеличилась область абляции ледника и вырос расход льда, которому принадлежит главная роль в формировании баланса массы. Баланс массы определяется климатическими факторами, главным образом атмосферной циркуляцией, от которой зависит приток тепла и влаги в Тяньшанский регион. В период умеренных колебаний баланса массы преобладала меридиональная циркуляция двух типов Е и С [1, 4, 5]. Циркуляция Е была более благоприятной для ледников, так как приносила повышенное количество осадков и сопровождалась понижением летних температур воздуха в гляциальной зоне. Другой тип С достаточно умеренно сменял первый, но резких ухудшений баланса массы не было, хотя наблюдались и отрицательные значения. Однако в период активного ухудшения балансовых характеристик ледника второй тип циркуляции С доминирует в атмосфере и тем самым способствует деградации ледника. Нет сомнений, что к этому типу циркуляции подключаются антропогенные воздействия на состояние атмосферы, но их масштабы не определены из-за отсутствия надежных количественных характеристик. К тому же следует сказать, что даже благоприятная для ледников циркуляция Е ослабила свое положительное влияние на жизнь ледника из-за уменьшения увлажненности и усиления притока тепла, что обычно было свойственно для циркуляции С, которая и теперь остается наиболее неблагоприятной для ледников. Уже в период после 1973 г. летние температуры воздуха возросли на 0,7...1,0 °С, поднялась граница питания выше нормы на 140 м, на 15...20 % от нормы уменьшилась аккумуляция, на 30 % увеличилась абляция, а максимально высокие величины отрицательного баланса на 200% превысили норму. В отдельные годы (1978, 1980) средняя летняя температура воздуха была на 1,6 °С выше нормы, а 1990 г. на 2,6 °С. Снеговая граница поднималась выше водораздела задней стены цирка ледника [3].

Период активного ухудшения баланса массы ледников других хребтов Тянь-Шаня начался также в 1972...1973 гг. Эта же тенденция наблюдалась и в Алайском хребте (1, 4, 13...15). Об этом свидетельствуют результаты прямых наблюдений на леднике Карабаткак в Терской Алатау, ледниках Голубина в Киргизском хребте, Абрамова в Алайском хребте и на леднике

№ 1 в восточной части тьяншанского региона. Баланс массы этих ледников хорошо коррелируется с ледником Туюксу (коэффициент корреляции в пределах 0,61...0,80), что характерно и для ледников Альп и Каскадных гор в Северной Америке. Связи эти объясняются тем, что макросиноптические условия в соответствующих регионах охватывают большие территории и, независимо от индивидуальных особенностей ледников, подчиняют их своему воздействию в той или иной степени. При этом количественные характеристики их режима, как правило, могут отличаться, но тенденция их эволюции одинакова для всех ледников, исключая пульсирующие ледники, которые развиваются по своим законам, не игнорирующим климатические колебания. Таким образом, испытывая систематически негативный баланс, ледник Туюксу, как и многие другие сокращается по длине, площади и объёму, что и было показано в начале этой статьи.

Эпизодически наблюдаемый позитивный баланс массы в настоящее время не в состоянии остановить процесс убывания ледников. Его влияние на изменение морфометрии нижних частей ледников очень незначительно. Как течение текущего благоприятного года, так и со сдвигом до 5 лет ледник не в состоянии стабилизировать фронт языка и высоту его поверхности. Это объясняется решающей ролью абляции льда на нижнем участке языка и весьма малой величиной притока льда на этот участок, который не в состоянии компенсировать потери льда.

**Кинематика ледника.** Наблюдая за аккумуляцией, абляцией и движением границы питания мы получаем данные о внешнем массообмене ледника. Зная баланс массы ледника в целом, остается неизвестным, как изменяется масса вследствие её перемещения сверху вниз, достаточна ли компенсация вынесенного из области аккумуляции льда атмосферными осадками (единственным источником пополнения ледниковых запасов) и насколько приток льда на язык может восстановить потерянные при абляции массы.

Разделом кинематических областей оттока и притока льда служит кинематическая граница питания (КГП). В отличие от внешней границы питания КГП более устойчива, и кинематические области питания (КОП) и области абляции (КОА) год от года изменяются незначительно. Разделенные же границей питания ELA (по терминологии Мировой службы мониторинга ледников) области аккумуляции и абляции значительно варьируют по площади вплоть до «катастрофического» состояния, когда весь ледник становится областью абляции для ранее накопленных запасов. Так, в период наблюдений за кинематикой ледника Туюксу в 1977...1992 гг. коле-

бания высоты КГП не превосходили 90 м. В тот же период размах колебаний ELA составил 450 м и весь ледник освобождался от снега. Естественно и баланс массы в этих случаях был экстремально отрицательным. Отсутствие необходимой компенсации потерь льда в КОП, и, как следствие, в КОА сказывается на изменении массы всего ледника и его деградации, что нам уже известно из стандартных оценок баланса массы. Изменение массы в кинематическом понимании практически тождественно балансу массы ледника в гляциологическом понимании. Рассматриваемый здесь период изучений кинематики ледника Туюксу совпал с крайне неблагоприятными для него климатическими условиями, которые продолжаются и в настоящее время (Таблица 1). Поэтому сейчас не приходится рассчитывать на то, что динамика массы льда будет способствовать улучшению гляциологического и кинематического режимов ледника. В таблице 1 представлена полная картина кинематики массы ледника Туюксу за 15 лет. Данные в ней являются результатом геодезических измерений, проводимых ежегодно в конце балансового года. Обращаю внимание на то, что все 3...4-х метровые рейки, маркировавшие поле ледника в КОА, из года в год перебуривались строго в той точке, где они были установлены первый раз. Геодезическая привязка их велась одновременно с двух опорных пунктов, связанных между собой и речником на леднике портативными приемопередающими радиостанциями. Измерения проводились в конце абляционного периода перед самым началом нового балансового года. В это же время ежегодно осуществлялась съёмка фронта ледника, через пять лет топографическая съёмка всей доступной части ледника.

Специфика поверхности ледников, характерная для долинных ледников альпийского типа, не позволяла нам устанавливать речные пункты в области питания и вести там прямые геодезические измерения. Поэтому масса льда, вынесенная из КОП, оценивалась по ее притоку в КОА ниже кинематической границы питания. В таблице 1 для сравнения даны высоты границ ELA и КГП и отношение определяемых ими площадей аккумуляции к площади всего ледника.

Из таблицы 1 следует, что в течение 15 лет (1977...1992 гг.) только один раз поверхность ледника незначительно повысилась +0,11 м (1981 г.). В остальные годы происходило ее систематическое понижение с амплитудой от -0,24 до -1,48 м. Чистый годовой баланс массы в КОП составил 0,18м, недостаточный для компенсации выноса льда в КОА, который достиг в среднем -0,95 м.



Основные показатели кинематики массы ледника Туюксу в 1977...1992 гг.

Год	КОП				КОА					Ледник в целом						
	$S_l$ , км <sup>2</sup>	$V_{hf}$ , м/г	$b_{nf}$ , м/г	$V_{sf}$ , м/г	$S_2$ , км <sup>2</sup>	$V_{ri}$ , м/г	$V_{hi}$ , м/г	$b_{ni}$ , м/г	$V_{si}$ , м/г	$S_3$ , км <sup>2</sup>	$V_s$ , м/г	$KГП$ , м	$AAR$ , %	$\Delta L$ , м/г	$ELA$ , м	$AAR$ , %
1977/78	1,00	-1,85	-0,10	-1,86	2,10	13,8	0,88	-2,18	-1,30	3,10	-1,47	3830	32	-16	4210	6
1978/79	1,00	-0,84	+0,34	-0,50	2,10	12,6	0,40	-0,93	-0,53	3,10	-0,52	3830	32	-15	3850	25
1979/80	1,22	-1,06	+0,29	-0,77	1,88	10,8	0,69	-1,23	-0,54	3,10	-0,63	3800	39	-5	3850	26
1980/81	1,80	-0,51	+0,55	+0,04	1,21	10,8	0,80	-0,56	+0,23	3,10	+0,11	3760	61	-12	3760	61
1981/82	1,14	1,07	+0,40	-0,66	1,88	10,9	0,65	-1,26	-0,61	3,02	-0,63	3800	38	-10	3800	38
1982/83	0,85	-1,02	-0,09	-1,21	2,17	10,0	0,44	-0,96	-0,56	3,02	-0,71	3850	24	-29	3930	24
1983/84	1,14	-0,64	-0,44	-1,08	1,88	9,8	0,39	-1,81	-1,42	3,02	-1,29	3800	38		4050	10
1984/85	1,23	-0,68	+0,13	-0,55	1,79	10,2	0,47	-0,91	-0,44	3,02	-0,48	3810	41	-7	3840	34
1985/86	1,05	-1,05	+0,39	-0,66	1,81	9,3	0,61	-1,24	-0,63	2,86	-0,64	3810	37	-19	3850	34
1986/87	1,15	-0,55	+0,26	-0,29	1,71	9,3	0,36	-0,79	-0,42	2,86	-0,37	3795	40	-11	3800	40
1987/88	1,20	-0,91	+0,22	-0,69	1,61	9,9	0,68	-1,23	-0,55	2,81	-0,61	3780	42	-18	3835	35
1988/89	1,13	-1,06	+0,22	-0,84	1,68	9,8	0,72	-0,86	-0,14	2,81	-0,43	3800	40	-13	3825	37
1989/90	1,13	-1,26	+0,17	-1,08	1,62	9,7	0,88	-1,78	-0,90	2,75	-0,98	3785	41	-19	3885	28
1990/91	1,12	-0,84	-0,33	-0,37	1,63	9,9	0,58	-1,62	-1,04	2,75	-1,09	3800	38	-(8)	3950	22
1991/92	1,04	-1,25	+0,51	-0,74	1,71	10,4	0,76	-0,70	0,06	2,75	-0,24	3800	38	-(8)	3800	38
Ср. 1977/92	1,15	-0,95	+0,18	-0,76	1,78	10,5	0,61	-1,23	-0,62	2,93	-0,67	3803	39	-	3880	30

Примечание: КОП – кинематическая область аккумуляции, КОА – кинематическая область абляции,  $S$  – площадь кинематических областей питания и абляции;  $b_{nf}, b_{ni}$  – баланс массы соответствующих областей.; где  $f, i$  – индексы областей питания (КОП) и абляции (КОА);  $V_h$  – изменение высоты поверхности за счет движения;  $V_s$  – суммарное изменение высоты поверхности за счет аккумуляции, абляции и движения в соответствующих областях и в целом по леднику;  $V_{ri}$  – горизонтальная компонента скорости льда.



В сумме поверхность ледника в КОП понизилась на 11,6 м или 0,77 м/год. Приток льда в КОА составил 0,61 м и год от года колебался в пределах от 0,36 до 0,88 м. В сумме он равнялся 9,15 м. Средняя величина чистого баланса здесь достигла – 1,23 м с амплитудой от 0,7 до 2,18 м, а в сумме поверхность КОА понизилась от абляции на 18,45 м. Приток льда из КОП компенсировал потери в КОА только наполовину (49,5 %), что привело к понижению поверхности КОА на 0,62 м/год. В целом поверхность ледника опускалась на 0,67 м/год.

Из приведенных данных следует, что область питания за годы наблюдений испытала большее понижение высоты поверхности по сравнению с областью абляции. Это подтверждается появлением в приводораздельных участках КОП выходов скал, которых в течение многих предыдущих лет не наблюдалось. Большой вынос массы объясняется усилением абляций в КОП, увеличением воды в леднике, перемещением в верх зон льдообразования и даже исчезновения верхних из них в связи с повышением летних температур воздуха. Однако, указанное соотношение в изменении высот в КОП и КОА было иным в предыдущих периодах (таблица 2).

Таблица 2

Скорости изменения высоты поверхности ледника Туюксу в результате движения льда и внешнего массообмена за разные периоды

Период	Область питания		Область абляции		Весь ледник
	$V_{hf}$	$V_{sf}$	$V_{hi}$	$V_{si}$	$V_s$
1977...1992	-0,95	-0,77	0,61	-0,62	-0,62
1958...1972	-0,59	0,08	0,61	-0,26	-0,10
1937...1964	-0,52	0,08	0,54	-0,35	-0,12
Среднее за 1939, 1943, 1944, 1958...1962 гг. (годы с наивысшим поднятием снеговой линии)	-0,81	-0,26	0,50	-0,57	-0,45

*Примечание:* Индексы и обозначения см. таблицу 1.

Так понижение поверхности в области абляции за период 1958...1972 гг. составило 0,26 м/год, а в сумме 3,64 м, т.е. в 2 раза меньше, чем в 1977...1992 гг. В период 1937...1964 гг. скорость изменения массы в области питания равнялась +0,08 м/год, а с учетом изменявшейся площади аккумуляции + 0,18 м/год. В области абляции поверхность понижалась со скоростью – 0,35 м/год, а в целом по леднику – 0,12 м/год, что в 5 раз меньше по сравнению с 1977...1992 гг. Эти данные свидетельствуют о том, что климатический фон в начале 20 века был более благоприятен для оле-

денения. По достаточно достоверным расчетам реконструкции баланса массы за ненаблюдаемые годы в совокупности с прямыми наблюдениями во второй половине прошлого столетия его средняя величина за 1879...1990 гг. составила  $-0,11$  м [3]. Понятно, что этот показатель образовался под влиянием подавляющего отрицательного баланса последних пятидесяти лет. Кинематические данные по леднику были сопоставлены с аналогичными наблюдениями на леднике Шумского в Джунгарском Алатау, так как в Тянь-Шане таких измерений нигде не проводилось. Сравнимые периоды не идентичны друг другу, но учитывая их длительность сопоставления вполне допустимы. Средняя величина притока льда на язык ледника Шумского составила за 18 лет с 1966 по 1984 гг.  $0,62$  м/год, столько же, сколько поступало льда в КОА ледника Туюксу. Чистый годовой баланс был выше у джунгарского ледника ( $-0,86$  м/год), у ледника Туюксу  $-1,23$  м/год, а понижение поверхности первого в области абляции составило  $-0,24$  м/год, у второго  $-0,62$  м/год. Ход изменений высоты поверхности в областях абляции обоих ледников и их чистого баланса массы практически одинаков, что свидетельствует о синхронности влияний климатических колебаний на режим ледников [11].

Большое количество различных данных, полученных при изучении кинематики, не может быть проанализировано в рамках данной статьи. На некоторых из них остановлюсь очень коротко. Как уже было сказано выше, только один 1980/81 год имел положительный баланс. Это привело к увеличению притока льда в КОА до  $0,8$  м, что на  $0,21$  м превысило среднюю величину притока за 15 лет. Чистый баланс массы в КОА составил  $0,56$  м, а изменение массы завершилось увеличением высоты поверхности до  $+0,23$  м. В КОП вынос массы льда в этот год сократился до  $-0,51$  м, а чистый баланс составил  $0,55$  м. Улучшение балансовых показателей явилось следствием увеличения количества осадков и понижения интенсивности абляции благодаря низким летним температурам воздуха. Как это сказалось на изменении длины ледника показал анализ скорости льда ( $V_{nl}$ ) и изменение высоты притока ( $V_h$ ) по продольной оси языка вниз от КГП. Оказалось, что показатели возрастают на участке сужения ледника, что характерно для долинных ледников, и уменьшаются в нижней части языка. Дефицит притока особенно сказывается на самом нижнем приконцевом участке, где он почти в 5 раз меньше чистой абляции льда. В 1981 г. лед двигался здесь со скоростью менее  $1$  м/год, а скорость поверхности составила  $0,53$  м/год, что в три раза меньше слоя стаявшего льда ( $1,53$  м). Замедление отступления по срав-

нению с другими годами было следствием уменьшения абляции льда на конце, которая в современных климатических условиях преобладает над скоростью движения льда и поверхности. Поэтому в 1981 г. ледник отступил всего на 5 м. По расчетам оказалось, что скорость отступления за счет абляции в 1977...1984 гг. превосходила в 10 раз величину наступания (0,9 м) за счет движения. Это соотношение в среднем сохранялось все 15 лет. В 1958, 1963, 1964 и 1972 годах при лучшем взаимодействии внешнего массообмена с кинематикой поверхности наблюдались небольшие наступания или стационарирование фронта. Это говорит о том, что ледник Туюксу быстро реагирует на изменение внешних условий. Для этого ему не нужно многих лет положительного баланса массы.

Из исследований изменений чистого баланса  $B_{ni}$  как функции высоты,  $V_{hi}$  как функцию кинематики,  $V_{si}$  и  $\Delta L$  (длины ледника) как результата взаимодействий внешних условий и кинематики следует, что на всем протяжении продольной оси ледника в КОА, близкой к линии тока и геометрической оси, ледник не получает полной компенсации затраченного при абляции льда. В верхней и средней части КОА сумма дефицита массы составляет  $-5...-8$  м, в нижней возрастает до 31 м, что за год равно, соответственно  $-0,3...-0,5$  м и более 2 м. В итоге средняя скорость льда в самой нижней части упала до нуля. Из-за нехватки дотации льда из КОП происходит сокращение длины ледника, которая за 15 лет достигла 180 м.

Исследования скорости льда, как функцию баланса массы в кинематической области абляции, показали следующее: скорость  $V_{ri}$  направлена в сторону убывания и во времени согласуется с кумулятой  $V_s$  всего ледника и тенденцией к уменьшению толщины льда. В годовых периодах колебания балансовых характеристик не отражаются на изменениях скорости льда, которая более инерционна по сравнению с динамичностью балансовых параметров. На фоне отрицательного тренда, изменения скорости льда год от года происходят неравномерно, если не сказать хаотично, что не связано с колебаниями толщины льда. Отсутствие связей между  $V_{ri}$  и  $V_s$  подтверждает выводы об отсутствии тесных связей изменений длины ледника  $\Delta L$  с  $V_s$  [10]. Нет прямой связи между изменениями  $V_r$  и  $V_h$  по длине и площади ледника, ход которых определяется формой ложа и углом наклона поверхности.  $V_r$  как самостоятельный показатель эволюции, самым тесным образом связан с толщиной льда, является его функцией. Но этот факт имеет значение только в достаточно продолжительных периодах (не менее 5 лет). По этому вопросу имеется много сведений о больших амплитудах колебаний скорости льда при неизменной его толщине. В более

длительных периодах при заметном уменьшении или увеличении толщины льда изменения скоростей, измеренных в разные годы, могут сами свидетельствовать о текущей эволюции ледника без каких-либо других показателей. Так, на леднике Туюксу максимальные скорости движения, равные в 1956...1965 гг. 22...24 м/год, в 1977...1992 гг. уменьшились до 16 м/год. Средняя взвешенная по площади КОА скорость движения в последний период равнялась 10,5 м/год с экстремальными от 9,3 до 13,8 м/год.

Помимо большого количества данных прямых наблюдений на леднике Туюксу и результатов сопоставлений различных геометрических параметров ледников на основе картографических материалов имеется много косвенных сведений об изменении высоты снежно-ледовых образований на вершинах Заилийского Алатау. Приведем два примера.

В 1943 г. Г.А. Авсюк определил высоту главной вершины Заилийского Алатау, трапецию Талгара, в 5017 м. Спустя 20 лет на картах появилась ее новая отметка 4974 м. Геодезисты это объясняют ошибками измерений. Однако вряд ли они при этом учитывали гляциологический фактор, который несомненно оказывает влияние на колебания высотных отметок вершин, не имеющих выходов скал и подверженных аккумуляции, абляции и движению льда. Автор дважды в 1949 и в 1951 гг. поднимался на Талгар, который поражает восходителей своим огромным ледяным панцирем многометровой толщины, вытянутым на сотни метров по водоразделу осевого хребта. Вершина расположена почти на 1000 м выше нулевой изотермы и не подвержена абляции в той мере, какую испытывают ледники на более низких хребтах. Поэтому потерю высоты за двадцать лет со скоростью около двух метров в год можно объяснить выдавливанием льда под действием силы тяжести в сторону областей питания двух ветвей из четырех самого большого в Заилийском Алатау ледника Корженевского. В климатической ситуации от середины до конца 20 века аккумуляция снега на вершине была не в состоянии компенсировать сток льда, что зафиксировано на леднике Туюксу. И вершина теряет высоту. Проверить этот гипотетический вывод можно лишь прямыми гляциогеодезическими измерениями.

Другой пример. Верховья ледника Туюксу увенчаны пиком Погребецкого. В 1937 г. топографы Р.Г. Тимофеев и В.В. Кислицин сделали съёмку ледника Туюксу и определили высоту пика в 4231 м. В 1950 г. автор отметил существование переметного ледника на южных склонах пика Погребецкого и большую заснеженность водораздела. В 1958 г. геодезисты из Высшей Технической Школы (Дрезден) провели стереофотограм-

метрическую съёмку ледников Туюксу и на карте появилась новая отметка пика Погребецкого 4219 м, что на 12 м ниже отметки 1937 г. «Понижение» высоты шло со скоростью 0,6 м/год, что вполне согласуется с величиной изменения высоты поверхности в КОП в 1977...1992 гг. Вполне вероятно, что в 1937 г. пик Погребецкого был покрыт снежно-фирновой шапкой, которая постепенно утоньшалась, обнажив скалы, которые теперь устойчиво венчают вершину. И главную роль в этом процессе играли недостаток аккумуляции, абляция и сток льда. Переметный ледник почти полностью растаял и только в некоторые годы его бывшее ложе покрывается снегом. В 1998 г. баварские стереофотограмметристы из Технического Университета (Мюнхен) повторили съёмку ледников Туюксу и не усомнились в высоте пика Погребецкого.

Два приведенных факта не единичны. Не раз мы слышали от геодезистов о несоответствии новейших высотных отметок вершин прежним их отметкам. И всегда речь шла о вершинах, покрытых снегом и высота их обычно не превышает 4500 м.

Из коротких комментариев к фактическим данным по балансу и кинематики массы ледника Туюксу следует ряд основных выводов:

- На протяжении почти полувекового периода прямых наблюдений четко прослеживается тренд к убыванию размеров ледника равно как и других ледников Тяньшанского региона по всем геометрическим параметрам длины, площади и массы;

- Практически все ледники подвержены вынужденным колебаниям указанных параметров. На фоне отрицательного тренда прослеживается быстрая реакция ледника Туюксу на улучшение внешних факторов, что немедленно отражается на росте его массы и сокращения размеров отступления;

- При относительно небольших колебаниях кинематической границы питания колебания выноса массы льда из КОП и притока его в КОА невелики и в целом достаточно устойчивы по сравнению с колебаниями высоты поверхности в обеих областях, зависящими в большей степени от внешних условий, чем от кинематики его массы;

- Не обнаружено связи скорости льда  $V_r$  как функции  $V_s$  в краткосрочных отрезках времени. Однако, такая связь есть в долгосрочном периоде: кумуляты баланса массы и движения сходны и их тренд одинаков, указывая на сокращение массы и падение скорости;

- При отсутствии данных о массообмене ледника скорость льда может самостоятельно выступать в качестве характеристики его эволюции;

- Нет связей между сокращением длины ледника и изменением массы льда в годовых отрезках времени, но в длительных периодах видна одинаковая и почти параллельная тенденция к уменьшению массы и длины ледника. На годовые изменения фронта ледника влияют и такие не режимные факторы, как углы наклона ложа приконцевого участка языка, прикрытие мореной контура льда, угол и толщина льда на конце.

- Рассмотрение режима ледника по кинематическим областям показало, что ледник не в состоянии получать компенсацию выносимых из области питания масс льда и компенсировать в области абляции потери льда вследствие его стаивания. Оценку условий стационарности или неустойчивости ледника следует вести через изменения массы в кинематических областях и в целом по леднику. Только при одновременном учете основных параметров внешнего массообмена ледника и кинематики его массы, закономерностей их изменений во времени возможно объективно моделировать эволюцию ледников, реконструкцию и прогноза их формы, размеров и режима.

- Приведенные в докладе факты об эволюции ледника Туюксу сигнализируют об опасной ситуации, которая в недалеком будущем может возникнуть в водном балансе горного региона и прилегающих к нему равнин. С сокращением ледников со временем уменьшится сток рек, особенно в летние периоды, когда резко возрастает потребность в воде водоёмных отраслей хозяйства.

Как в ближайшем и отдаленном будущем будет развиваться режим ледников сказать трудно. Только надежный климатический прогноз мог бы содействовать гляциологическому прогнозу, исходя из того, что ледники весьма чутко реагируют на любые климатические колебания. Дальнейшая эволюция ледника Туюксу оценивается по-разному. По одной версии, высказанной в середине прошлого века, ледник не исчезнет, а только существенно истощится к 2340 году. По другой - ледник растает в третьей четверти 21 века в связи с прогнозируемым повышением глобальной температуры воздуха. Исходя из темпов эволюции за 40 наблюдаемых лет (1958...1998) исчезновение ледника Туюксу по площади должно затянуться на 200 лет, а по массе – 120 лет. Такая же участь ожидает многие ледники Тянь-Шаня. И только в самых верхних частях горной страны ледникам не грозит исчезновение в ближайшие сто и более лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзин В.Б. Баланс массы ледника Голубина за 1959-60 гг. // МГИ, 1985. – Вып. 53 С. 44-55.

2. Байдал М.Х. Колебания режима ледников в связи с микроциркуляционными эпохами. // МГИ, 1964. – Вып. 10. – С. 112-120.
3. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. – Алматы, 2001. – 252 с.
4. Вилесов Е.Н. Баланс массы ледника Туюксу в последнее десятилетие 20 века. / Гидрометеорология и экология. – 2003. – № I. – С. 80–84.
5. Диких А.Н. Режим современного оледенения Центрального Тянь-Шаня. – Фрунзе: изд. Илим, 1982. 154 с.
6. Ледники Туюксу. – Макаревич К.Г. и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 171 с.
7. Макаревич К.Г. и др. Оледенение Заилийского Алатау. – М.: 1969. – 288 с.
8. Макаревич К.Г., Денисова Т.Я. Климатическая обусловленность гидрологического режима ледников. // Гляциологические исследования в Казахстане. 1973. – Вып. 9. – С. 39-49.
9. Макаревич К.Г. Ледник Туюксу. – Алма-Ата, изд. Кайнар, 1985. – 17 с.
10. Макаревич К.Г., Тюлина Т.Ю. Перемещение конца ледника Туюксу и годовой баланс его массы. // МГИ, 1991. – Вып. 73. – С. 122-125.
11. Оледенение Тянь-Шаня (под ред. М.Б. Дюргерова) – М.: 1995, 171 с.
12. Пальгов Н.Н. Современное оледенение Заилийского Алатау. – Алма-Ата, 1958. – 312 с.
13. Glacier Mass Balance // Bulletin №5 (1996-1997), Zurich IAHS – UNEP – UNESCO. – 96 p.
14. Glacier Mass Balance // Bulletin №6 (1998-1999), Zurich IAHS – UNEP – UNESCO. – 96 p.
15. Glacier Mass Balance // Bulletin №7 (2000-2001), (в печати).
16. Fluctuations of Glacier, 1990-1995, World Glacier Monitoring Service. – Zurich IAHS – UNEP – UNESCO, 1998. – Vol. VII. – 291 p.

Институт географии

**ТҰЙЫКСУ МҰЗДЫҒЫНЫҢ МЫСАЛЫНДА ТЯНЬ-ШАНЬ  
МҰЗДЫҚТАР МАССАСЫНЫҢ БАЛАНСЫ МЕН  
КИНЕМАТИКАСЫ**

Геогр. ғылымд. канд.                      К.Г. Макаревич

*Көпжылдық бақылаулардың негізінде, деректері қысқа мерзімдегі аймақта гляциосфераның эволюциясын қарастырған.*