

УДК 551.324.6

**ЛЕДНИК ТУЮКСУ: РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ
СЪЕМОК 1958 И 1998 гг.**

Доктор геогр. наук Е.Н. Вилесов
 В.И. Морозова

На основе картометрического анализа топоизображения ледника Туюксу по съемкам немецких специалистов в 1958 и 1998 гг. фиксируются изменения его гляциоморфометрических показателей за 40 лет.

В 1958 г. в рамках исследований Заилийской ледниковой экспедиции АН КазССР по программе Международного геофизического года геодезистами из Германской Демократической Республики была проведена крупномасштабная стереофотограмметрическая (фототеодолитная) съемка горно-ледникового бассейна Туюксу в верховьях р. Малой Алматинки. По результатам этой съемки составлена карта бассейна Туюксу в масштабе 1:10 000 (с сечением горизонталей через 10 м), изданная в Дрездене (ГДР) в 1961 г. [11]. Ее авторы – Н. Hartmann, М. Simon и У. Тоерплер. Эта карта на долгие годы стала надежной топоосновой для расчета различных режимных и балансовых характеристик поверхности ледника.

Ровно через 40 лет, летом 1998 г., аналогичную съемку ледников Туюксу произвели специалисты Института фотограмметрии и картографии Мюнхенского технического университета и комиссии по гляциологии Баварской Академии наук К. Eder, Т. Geiss и Н. Rentsch. При этом плановые и высотные координаты 45 опорных точек были определены тригонометрически, а для 17 пунктов – с помощью портативного комплекта приборов GPS. В итоге этих работ появилась новая карта района Туюксу того же масштаба, опубликованная на русском и немецком языках в Мюнхене (ФРГ) в 2001 г. [5].

Сопоставление цифровой модели местности 1998 г. с картой 1958 г. позволило выявить изменения контуров, морфологии и морфометрии, площадных и объемных размеров всех 10 ледников района за 40 лет. Результаты этого сравнения по каждому леднику приведены в работе [10].

Настоящее же наше сообщение посвящено анализу изменений, произошедших за эти годы, с главным в этом бассейне долинным ледником Туюксу, входящим в глобальную сеть Мировой службы мониторинга ледников. Результаты расчетов по изменению площадей, высоты поверхности и потерь объема льда по 50-метровым высотным интервалам и по леднику в целом, по данным [10], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение морфометрических показателей ледника Туюксу с 1958 по 1998 г. (по [10])

Высотная зона, м	Площадь в 1958 г., м ²	Площадь в 1998 г., м ²	Разность площадей, м ²	Разность высот, м	Разность объемов, м ³
3350...3400	25 472	0	-25 472		-1 221 020
3400...3450	99 264	33 664	-65 600	-53,319	-5 060 590
3450...3500	156 608	78 528	-78 080	-40,037	-5 549 310
3500...3550	163 712	140 096	-23 616	-30,969	-5 210 560
3550...3600	240 896	152 128	-88 768	-21,520	-4 242 050
3600...3650	158 912	118 272	-40 640	-16,279	-2 264 040
3650...3700	180 992	196 736	15 744	-12,275	-2 467 960
3700...3750	455 872	437 120	-18 752	-11,525	-5 097 550
3750...3800	475 200	378 368	-96 832	-11,169	-4 574 950
3800...3850	229 824	207 936	-21 888	-10,045	-2 177 820
3850...3900	163 584	140 160	-23 424	-9,312	-1 445 780
3900...3950	133 568	113 024	-20 544	-7,399	-933 000
3950...4000	145 344	126 336	-19 008	-3,021	-429 540
4000...4050	147 776	132 992	-14 784	0,227	29 090
4050...4100	158 528	183 744	25 216	-2,343	-589 320
4100...4150	119 296	129 856	10 560	-4,111	-563 310
4150...4200	33 792	50 112	16 320	2,270	70 570
4200...4250	512	5 888	5 376	7,399	-4 200
Всего	3 089 152	2 624 960	-464 192	-11,852	-41 731 340

По существу, данными табл. 1 исчерпывается вся информация об изменении состояния ледника Туюксу за 40 лет. Как видим, за это время, по [10], ледник сократил свою площадь на 0,464 км², стал тоньше почти на 12 м и потерял в объеме 41,7 млн м³.

По поводу данных табл. 1 и содержания карты [5] у нас имеется ряд замечаний (или вопросов). Приведем некоторые из них.

1. И в 1958, и в 1998 г. высшей точкой ледника был и остается пик Погребецкого (4219 м), что, собственно, и отражено на обеих картах [11]

и [5]. Почему же тогда в расчетах [10] высота высшей точки в 1958 г. принята равной 4208,2 м, а в 1998 г. – 4213,2 м?

2. На карте [5] высота низшей точки конца ледника в 1998 г. обозначена отметкой 3412 м, а в расчетах [10] она принята равной 3417,6 м. Чему верить (видимо, [10])?

3. На карте 1958 г. [11] для большинства ледников бассейна, включая Туюксу, показано положение фирновой границы. На карте 1998 г. [5] эта граница не зафиксирована, и вся площадь ледника Туюксу отнесена к области абляции. В действительности же, по натурным измерениям, в 1998 г. фирновая линия проходила на высоте 3780 м, а площадь области абляции составляла 64% от общей площади ледника.

4. Вряд ли есть необходимость и смысл приводить в [10] величины площади высотных зон ледника с точностью до 1 м^2 , а изменение высоты поверхности – до 0,001 м (табл. 1).

5. Не понятно, почему в самой верхней высотной зоне (4200-4250 м) при увеличении площади льда за 40 лет на порядок и повышении высоты поверхности на 7,4 м объем льда уменьшился (на 4200 м^3)?

6. В табл. 1 не дана величина изменения высоты поверхности льда для нижней зоны 3350...3400 м. Если же изменение объема льда в ней ($1\,221\,020 \text{ м}^3$) отнести к площади растаявшего льда, то средняя толщина льда в этой зоне получается равной 48 м. Очевидно, такой толщины льда в концевой части ледника быть не может. По данным сейсмических исследований в 1957 г. [1], радиолокационного зондирования 1981 и 1982 гг. [2] и непосредственного бурения [7, 8] толщина льда здесь не превышала 10-20, максимум – 30 м. Кстати, то же самое можно сказать и о явно завышенной средней величине слоя растаявшего льда ($>53 \text{ м}$) в интервале высот 3400...3450 м (табл. 1). По уже нашим расчетам, такой слой стаявшего льда имеет место лишь на небольшом участке следующей зоны, точнее – в сегменте 3470...3480 м, то есть именно там, где в 1957 г. была заложена скважина №1 для измерений температуры льда, достигшая на глубине 52,6 м донной морены.

Мы произвели собственные расчеты по изменению морфометрических характеристик ледника Туюксу. В их основе лежит сравнение цифровых моделей топоосновы ледника 1958 и 1998 гг. При анализе карты 1998 г. использовалась система координат карты 1958 г., что позволило достаточно просто сравнивать эти разновременные карты при их совмещении. Проведенные картографические изыскания были реализованы в

программах MapInfo версий 6.5 и 7.0, Easy Trace 7.0, GeoTransformer 4.1. Все контуры ледника были получены путем ручной обработки (оцифровки). В его контуры не включались мертвые льды, конечные и боковые морены. Отступившая за 40 лет часть языка ледника покрыта сплошным моренным чехлом, не имеющим, по-видимому, под собой погребенного льда.

Наши измерения и расчеты для языковой части ледника, до 3800 м, осуществлялись по сегментам тела ледника в соответствии с 10-метровым сечением рельефа, а для крутых участков области аккумуляции, выше 3800 м, – через 50-метровые высотные интервалы. Данные этих расчетов представлены в табл. 2, где они для лучшего сопоставления с величинами из табл. 1 приведены по 50-метровым высотным интервалам.

Таблица 2

Изменение морфометрических показателей ледника Туюксу за 1958...1998 гг. (по расчетам авторов)

Высотная зона, м	Площадь в 1958 г., м ²	Площадь в 1998 г., м ²	Разность площадей, м ²	Разность высот, м	Разность объемов, м ³
3350...3400	26 810	0	-26 810	-10	-268 100
3400...3450	101 550	31 540	-70 010	-32	-3 249 600
3450...3500	161 790	77 710	-84 080	-52	-8 413 080
3500...3550	161 160	140 470	-20 690	-38	-6 124 080
3550...3600	220 730	153 200	-67 530	-25	-5 518 250
3600...3650	152 190	120 410	-31 780	-18	-2 739 420
3650...3700	186 450	198 910	12 460	-15	-2 796 750
3700...3750	465 760	435 280	-30 480	-13	-6 054 880
3750...3800	493 660	370 880	-122 780	-12	-5 923 920
3800...3850	238 580	199 680	-38 900	-10	-2 385 800
3850...3900	170 730	136 220	-34 510	-5	-853 650
3900...3950	136 260	111 640	-24 620	1	136 260
3950...4000	149 600	125 440	-24 160	6	897 600
4000...4050	154 110	129 660	-24 450	8	1 232 880
4050...4100	169 330	179 970	10 640	5	846 650
4100...4150	118 390	117 670	-720	4	473 560
4150...4200	32 100	41 620	9 520	3	96 300
4200...4250	1 940	7 020	5 080	5	9 700
Всего	3 141 140	2 577 320	-563 820	-11	-40 634 580

Таким образом, потери ледника Туюксу между 1958 и 1998 гг. составили по площади 0,564 км², по толщине льда – 11 м и по объему – 40,635 млн м³.

По нашим данным, площадь ледника в 1958 г. равнялась $3,141 \text{ км}^2$ (на $0,052 \text{ км}^2$ больше, чем по [10]). Заметим, что именно эта величина была получена нами в 60-е гг. [8] путем неоднократного планиметрирования контура ледника на карте 1958 г. Вместе с тем, площадь ледника в 1998 г. у нас оказалась на $0,048 \text{ км}^2$ меньше, чем по [10]. Поэтому потеря площади льда за 40 лет в нашем варианте оказалась ровно на $0,1 \text{ км}^2$ больше, чем в [10].

Как и следовало ожидать, наибольшее сокращение площади льда (у нас – $0,301 \text{ км}^2$, у немецких исследователей – $0,322 \text{ км}^2$) приходится на нижнюю и среднюю части языка ледника – до высоты 3650 м . Эта закономерность четко прослеживается в изменении формы дифференциальных и, особенно, интегральных кривых распределения площади льда по высоте (рис. 1), построенных по данным табл. 2.

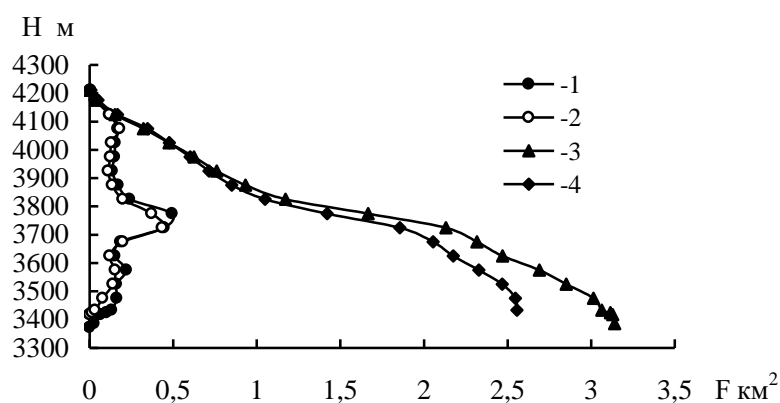


Рис. 1. Дифференциальные и интегральные кривые распределения площади ледника Туюксу по высоте. 1 – дифференциальная кривая 1958 г.; 2 – дифференциальная кривая 1998 г.; 3 – интегральная кривая 1958 г.; 4 – интегральная кривая 1998 г.

Интересно, что в верхней части области абляции, в интервале $3650 \dots 3700 \text{ м}$, как по нашим, так и по данным [10], зафиксировано заметное увеличение площади более чем на $10\,000 \text{ м}^2$ за счет территории лежащей выше соседней зоны ($3700 \dots 3750 \text{ м}$). Этот факт, видимо, связан с выполаживанием и выравниванием физической поверхности ледника в результате таяния льда.

Увеличение площади льда в горизонтальной проекции в пределах фирнового бассейна выше 4050 м в 1998 г. по [10] оказалось значительно большим, чем у нас. Причин этому может быть несколько. Это и разное

отображение границ ледника на обеих картах; и включение в контур ледника участков, покрытых снегом, но не имеющих отношения к телу ледника; и «захват» крупных участков верховьев фирновой зоны, спускающихся на южный склон водораздельного гребня и лежащих уже за ледоразделом и др.

Исходя из нового значения площади ледника в 1998 г. (2,577 км²), ее среднее годовое сокращение за время между съемками составило 0,014 км², или, примерно, по 0,5%/год.

По нашим подсчетам, длина ледника (по линии тока от пика Погребецкого до конца языка) в 1958 г. равнялась 3,56 км, а в 1998 г. – 3,02 км, то есть уменьшение длины составило 540 м, а средняя скорость отступления – 13,5 м/год. За 40 лет высота конца языка поднялась почти на 45 м (с 3373 до 3417,6 м), по 1,1 м/год.

По натурным наблюдениям, средняя высота снеговой границы (ELA) в 1958...1998 гг. оказалась равной 3828 м. В многоснежном 1958 г. по карте [11] ELA располагалась на высоте 3630 м, а в конце периода таяния (по наблюдениям) она поднялась до 3670 м. При этой ELA в 1958 г. площадь зоны абляции была равна 0,885 км², а зоны аккумуляции – 2,256 км². При таком соотношении площадей обеих зон величина ледникового коэффициента в 1958 г. составила 2,55, а коэффициента AAR (отношение площади питания ко всей площади ледника) – 0,72. В 1991...1998 гг. при средней ELA, равной 3850 м [3], площади областей абляции и аккумуляции были равны, соответственно, 1,728 и 0,849 км², ледниковый коэффициент – 0,49 и AAR – 0,33. Значит, за 40 лет ледниковый коэффициент уменьшился в 5,2, а AAR – в 2,2 раза.

Одной из основных задач повторного крупномасштабного картографирования ледников, наряду с определением изменений их площади, является и, что не менее важно, установление изменений их объема. При сравнении данных из табл. 1 и 2 прежде всего обращает на себя внимание довольно заметная разница в потере льда в концевой части ледника и в его приращении – в области питания, что хорошо просматривается в конфигурации соответствующих кривых на рис. 2. Эта разница на конце ледника объясняется соображениями, изложенными выше – в шестом пункте наших комментариев. Что касается зоны питания, то различия в потерях и приросте льда здесь обусловлены большими перепадами высот. В случаях сильного сгущения горизонталей даже небольшая несовместимость от-

дельных участков моделей, порядка 1 мм, может привести к разным результатам подсчета.

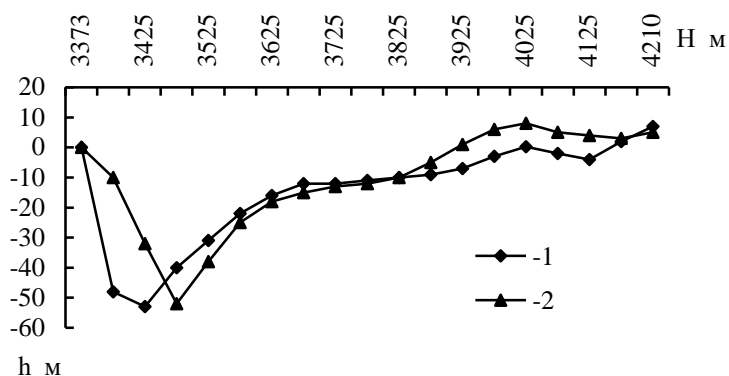


Рис. 2. Изменение величины слоя льда (h , м), потерянного за период 1958...1998 гг. по высотным зонам (H , м) ледника Туюксу по данным табл. 1(1) и табл. 2 (2).

Все же можно полагать, что кривая 2 на рис. 2 более верно отражает реальное изменение высоты поверхности по продольному профилю ледника, потерю вещества в зоне абляции и его приращение в зоне питания. Тем не менее, величины суммарных потерь объема льда, по данным [10] и нашим, почти равновелики (41,731 и 40,635 млн м³), отличаясь друг от друга лишь на 1 млн м³ (около 2,5%).

Возникает вопрос – какая же часть объема ледника потеряна за последнее 40-летие? При площади ледника в 1958 г. 3,141 км² его объем, вычисленный по известной формуле Н.В. Ерасова [6] и приведенный в [8], был равен 0,1503 км³. Следовательно, к 1998 г. было потеряно 27% от объема ледника в 1958 г., или по 0,68%/год, то есть несколько больше (примерно на 1/3) скорости сокращения площади. В 1998 г. объем ледника можно оценить в 0,110 км³.

Однако, в действительности, так сказать, истинные потери льда значительно превышают 40 млн м³. Эти истинные потери за рассматриваемый период, согласно [3, 4], составили 78 млн м³. Существенная разница между величинами потерь льда, полученными из сравнения карт и натурных измерений, равная почти 50%, обусловлена динамикой ледника, то есть непрерывным поступлением вещества из области питания в зону абляции за счет движения. Этот процесс Н.Н. Пальгов [9] в свое время назвал «привносом».

Очевидно, при картометрическом анализе разновременных карт ледников можно оценить величину этого привноса. Последняя за 40 лет оказалась равной 37,4 млн м³. Этот объем, отнесенный к средней площади абляции за тот же период (1,859 км²), дает суммарный привнос в 20 м. Отсюда величина годового привноса или притока льда на площадь языка равна 0,5 м, или порядка 1 млн.м³, чего совершенно недостаточно для компенсации потерь льда в зоне абляции. По [9], годовой привнос на язык ледника Туюксу в 1937...53 гг. составлял 0,44 м. Таким образом, величина привноса за последнее 40-летие, несмотря на уменьшение толщины льда и скорости движения, слегка увеличилась за счет сокращения длины ледника.

Наконец, несколько слов о балансе массы ледника. Величину чистого баланса (без учета накопления сезонного снега и его стаивания) можно оценить из произведения плотности льда и соотношения потерь объема ледника к его средней площади за 40-летний временной интервал. Рассчитанная таким путем величина чистого годового баланса массы ледника оказалась отрицательной и равной – 32 г/см². Эта цифра на 11 г/см² меньше (по модулю, но не по знаку) полного годового баланса ледника, определенного за те же годы из натуральных измерений аккумуляции и абляции.

Таким образом, использование повторного крупномасштабного картографирования и цифрового моделирования ледников открывает благоприятные возможности для получения разнообразной гляциологической информации, позволяющей судить о направленности эволюции оледенения. Приведенные здесь сведения являются вкладом в банк данных «Ледник Туюксу», составляемый сейчас в Институте географии МОН РК.

В заключение остается выразить благодарность нашим немецким коллегам за выполненную трудоемкую работу и высказать пожелание и надежду о проведении подобной съемки бассейна Туюксу еще через 40 лет – в 2038 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берзон И.С., Боканенко Л.И., Исаев В.С. Сейсмические исследования на леднике Туюксу (IX и XII разделы программы ММГ – гляциология и сейсмология, №3). – М: АН СССР, 1959. – 68 с.
2. Боброва Л.И., Василенко Е.В., Макаревич К.Г., Мачерет Ю.Я., Меньщиков В.А., Никитин С.А. Толщина льда и подледный рельеф ледника Туюксу // Материалы гляциол. исслед. Вып. 64. – М.: 1998. – С. 73-76.

3. Вилесов Е.Н. Баланс массы ледника Тууюксу в последнее десятилетие 20 века // Гидрометеорология и экология. – 2003. – №1. – С. 80-84.
4. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. – Алматы, Казак университеті, 2001. – 252 с.
5. Горно-ледниковый бассейн Тууюксу, Заилийский Алатау. Карта М 1:10 000. Комиссия по гляциологии Баварской Академии наук. – Мюнхен: 2001 (на русск. и нем. языках).
6. Ерасов Н.В. Метод определения объема горных ледников / Материалы гляциол. исслед. Вып. 14. – М.: 1968. – С. 307-308.
7. Ледник Тууюксу. Tuuyksu Glacier. (Сост. К.Г. Макаревич). – Алма-Ата: Кайнар, 1985. – 20 с. (на русск. и англ. языках).
8. Ледники Тууюксу (Северный Тянь-Шань). – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 172 с.
9. Пальгов Н.Н. Современное оледенение в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: АН КазССР, 1958. – 312 с.
10. Eder K., Geiss T., Rentsch H., Kokarev A., Uvarov V. Surveying and Mapping of the Tuuyksu Glacier Region (Tien Shan), Scale 1:10 000. – Fluctuations of Glaciers. – In Press.
11. Gletschergebiet Tujuksu, Sailiski Alatau. М 1:10 000. - Institut für Kartographie Т.Н. Dresden. – VEB Hermann Naack, 1961.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби

ТҰЙЫҚСУ МҰЗДЫҒЫ: 1958 ЖӘНЕ 1998 ЖЫЛДАРДАҒЫ СУРЕТТЕР- ДІ САЛЫСТЫРЫП ТАЛДАУДЫҢ НӘТИЖЕЛЕРІ

Геогр. ғылымд. докторы Е.Н. Вилесов
В.И. Морозова

Тұйықсу мұздығында 1958 және 1998 жылдары неміс мамандары тусірген суреттерге картометриялық талдау жүргізу арқалы, осы мұздықта 40 жыл арасында байқалған топографиялық өзгерістер гляциоморфометриялық көрсеткіштермен бейнеленген.