doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-21-40

Гидрологический режим ледников в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая

© 2018 г. В.Г. Коновалов, В.А. Рудаков

Институт географии РАН, Москва, Россия vladgeo@gmail.com

Hydrological regime of glaciers in the river basins of the Northern Caucasus and Altai

V.G. Konovalov, V.A. Rudakov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia vladgeo@gmail.com

Received August 2, 2017

Accepted November 28, 2017

Keywords: Altai, evaporation, glacier changes, glacier runoff, modeling, Northern Caucasus, precipitation, water balance.

Summary

Rivers with snow-glacier alimentation in six basins of the Northern Caucasus (Cherek, Chegem, Baksan, Malka, Teberda, and upper course of the Terek River) and Altai (the Katun' River) were investigated in 1946-2005 for the purpose to analyze long-term streamflow variations. It was noted that in 1976-2005 volume of annual runoff increased relative to the previous 30-year interval in four of six rivers of the Northern Caucasus. During the vegetation period the volume of runoff changed synchronously with the annual one. As for the river Katun, its volumes and variability of both, the annual runoff and that for the vegetation season, decreased. In the course of investigation of spatial-temporal dynamics of hydrological and glaciological characteristics in the above river basins of the Northern Caucasus and the same of Katun' River the following problems were considered and solved: a) the information and methodological basis for regional calculations of the runoff for the rivers with snow-glacier alimentation had been improved and corrected; b) changes of the components of hydrological cycle (precipitation, evaporation, and glacier runoff) over the glaciation area had been estimated for the period of 1946–2005; c) data on quality of the initial glaciological and hydrological information were integrated; d) definitions of the runoff were verified by means of comparison of measured runoff with similar values calculated by equation of the annual water budget as a whole for the basin. It should be noted that the total areas of glaciers and areas of their ablation were significantly reduced, but areas and thicknesses of ice under the moraine cover increased. Despite widespread, sometimes twofold decrease in the relative part of glacier alimentation in the total river streamflow for period of April-September this did make almost no effect on the water supply of the vegetation period in individual basins as well as in the whole the Northern Caucasus.

Citation: Konovalov V.G., Rudakov V.A. Hydrological regime of glaciers in the river basins of the Northern Caucasus and Altai. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018. 58 (1): 21–40. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-21-40

Поступила 2 августа 2017 г.

Принята к печати 28 ноября 2017 г.

Ключевые слова: Алтай, водный баланс, изменение оледенения, испарение, ледниковый сток, моделирование, осадки, Северный Кавказ.

Анализ изменения составляющих водного баланса в шести речных бассейнах Северного Кавказа и в бассейне р. Катунь на Алтае выполнен для двух временных интервалов: 1946–1975 и 1976–2005 гг. Метод определения составляющих водного баланса включает в себя модель сезонного стока от таяния снега и льда в областях аккумуляции и абляции ледников, а также комплекс расчётных формул для определения осадков, температуры и влажности воздуха, интенсивности таяния льда под мореной и открытого льда, испарения в интервалах высоты для основных типов поверхности на ледниках. Относительная разность между измеренным и рассчитанным стоком для бассейнов на Северном Кавказе составила в 1946–1975 гг. 2,6%, а в 1976–2005 гг. 8,9%.

Введение и постановка задачи

Современное континентальное оледенение России сосредоточено в основном в пределах Кавказа, Сибири и Камчатки. Наиболее крупные по площади и объёму области оледенения находятся в бассейнах рек Терек, Кубань (Северный Кавказ) и в верховьях бассейна р. Обь (Горный Алтай), — они и были выбраны в качестве объектов нашего исследования. Источниками формирования стока в этих речных бассейнах служат подверженные климатическим колебаниям твёрдые и жидкие осадки, а также таяние многолетнего льда горных ледников, которое, кроме того, зависит от особенностей их саморазвития и изменяющихся во времени высотно-площадных параметров оледенения.

Для описания многолетних колебаний стока рек снегово-ледникового типа питания в течение 1946-2005 гг. на территории Северного Кавказа и Сибири выбраны следующие бассейны: верховье р. Терек (гп – гидропост Владикавказ), р. Черек (гп Советский), р. Чегем (гп Нижний Чегем), р. Баксан (гп Заюково), р. Малка (гп Каменномостский), р. Теберда (гп Теберда), р. Катунь (гп Сростки). Выбор временного интервала обусловлен наличием и доступностью ежемесячных и синхронных гидрологических и климатических данных. В отличие от них региональные сведения о высотно-площадных характеристиках оледенения, опубликованные в [1-3], не синхронны с многолетней гидролого-климатической информацией. В Каталоге ледников СССР [1, 2] диапазон однократных определений морфометрических параметров ледников охватывает 1943-1968 гг., а в Каталоге RGI v.5 [3] - 1965-2004 гг. (Северный Кавказ) и 2006—2013 гг. (бассейн р. Катунь, Алтай).

Учитывая разновременность данных в каждом из цитированных источников региональной гляциологической информации, а также определённую инерцию сохранения морфометрических параметров, по крайней мере, в пределах современной точности высотно-площадных оценок (об этом будет сказано далее), в нашем исследовании принято, что гляциологические характеристики из Каталога ледников СССР [1, 2] обобщённо относятся к середине 1946-1975 гг., а из Каталога RGI v.5 [3] - к середине 1976-2005 гг. Выбор принятых интервалов обусловлен как правилами статистически обоснованного сравнения временных рядов, так и состоянием синхронности сведений о динамике высотно-площадных параметров совокупностей ледников, гидрологических и климатических характеристик. Этот важный этап работы рассмотрим более подробно.

I. Необходимым и очевидным условием оценки ледникового стока в масштабе речных бассейнов служит охват всех ледников. Этому требованию соответствуют только справочники – Каталог ледников СССР [1, 2] и Каталог RGI v.5 [3]. В 12 выпусках Каталога [1] временная привязка однократных определений высотно-площадных параметров 914 ледников Северного Кавказа (N_{gl} – число ледников, F_{gl} – площадь ледников) распределена следующим образом: год неизвестен (N_{gl} = 523, F_{gl} = 340 км²); 1955 г. (N_{gl} = 15, F_{gl} = 15,0 км²); 1957 г. (N_{gl} = 375, F_{gl} = 558,3 км²); 1959 г. ($N_{gl} = 1$, $F_{gl} = 0,3 \text{ км}^2$). Для той же территории в Каталоге RGI v.5 [3] аналогичные показатели выглядят следующим образом: 1957 г. ($N_{gl} = 2, F_{gl} = 1,2 \text{ км}^2$); 1960 г. ($N_{gl} = 6, F_{gl} = 1,9 \text{ км}^2$); 1962 г. ($N_{gl} = 301, F_{gl} = 144,0 \text{ км}^2$); 1999 г. ($N_{gl} = 36, F_{gl} = 57,5 \text{ км}^2$); 2000 г. ($N_{gl} = 271, F_{gl} = 265,1 \text{ км}^2$); 2001 г. ($N_{gl} = 150, F_{gl} = 171,8 \text{ км}^2$); 2004 г. ($N_{gl} = 209, F_{gl} = 229,5 \text{ км}^2$). По таким данным, расчёт ежегодного ледникового стока W_{gl} в речных бассейнах невозможен из-за несовместимости временных интервалов по отдельным ледникам. В этом случае приходится применять осреднение гляциологических параметров и метеорологических характеристик за интервалы, длина которых, по правилам климатологии, должна быть от 15 до 30 лет.

II. Для определения временных пределов будущего осреднения использованы данные из Каталога RGI v.5 [3]. При этом возможны два варианта.

1. Задать 1995 г. в качестве середины, например, 16-летнего промежутка, который определён как средневзвешенный по площади ледников в интервале 1957—2004 гг. Тогда для расчёта среднего ледникового стока W_{gl} придётся брать из Каталога RGI v.5 данные, относящиеся к интервалу 1987—2003 гг. В этом случае будет проигнорирована информация 1965 и 2004 гг.

2. Использовать в качестве середины интервала 2000 г., когда во временном распределении информации была наибольшая плотность значений N_{gl} и F_{gl} . При этом выбирать данные придётся из интервала 1992—2008 гг., игнорируя 1965 г.

Экстраполяция результатов в случаях 1 и 2 на данные Каталога [1] даёт интервалы осреднения соответственно 1939—1955 и 1944—1960 гг., из которых второй вариант предпочтительнее. Для выполнения условия охвата данных по всем ледникам из Каталогов [1—3] при расчёте W_{gl} был принят оптимальный вариант осреднения гляциологической и метеорологической информации по 30-летним интервалам: 1946—1975 и 1976— 2005 гг. Для интервала 1946—2005 гг. и более поздних лет имеются нерегулярные оценки состояния оледенения на Кавказе и Алтае [4, 5]. Однако в этих работах приведены сведения только о площадях ледников, что недостаточно для моделирования и расчёта ледникового стока.

Сводные гидрографические данные и характеристики оледенения для перечисленных здесь бассейнов рек Северного Кавказа и Алтая приведены в табл. 1 и 2. Сведения по стоку получены из

		Речные бассейны (гидропосты) и площади речных бассейнов до гидропоста, км ²								
Порометри	Баксан	Малка	Теберда	Терек, верховье	Чегем	Черек		Катунь		
Параметры	(Заюково)	(Каменномост-	(Теберда)	(Владикавказ)	(Нижний	(Советский)	Σ / <i>Mean</i>	(Сростки)		
	2100	ский) 1540	504	1490	Чегем) 739	1350		58 400		
$W_{-}(1)$	1,06**	0,43	0,81	1,05	0,43	1,21	4,98	19,60		
$W_{bas}(1)$	1,10	0,48	0,80	1,02	0,49	1,72	5,31	18,76		
$dW_{bas}(1)$	4,3	10,9	-0,9	-3,4	14,7	5,3	6,4	-4,3		
W(2)	0.86	0,31	0,70	0,82	0,36	0,99	4,03	16,75		
$w_{bas}(2)$	0,86	0,35	0,67	0,81	0,41	1,12	4,22	15,93		
$dW_{bas}(2)$	0,5	12,8	-4,2	-1,0	16,1	13,0	4,8	-4,9		
$C_{\rm P}W_{\rm c}(1)$	0,08	0,12	0,11	0,16	0,08	0,09	0,11	0,20		
$CVW_{bas}(1)$	0,13	0,21	0,12	0,17	0,24	0,22	0,18	0,11		
$C_{\rm P}W_{\rm c}(2)$	0,08	0,16	0,23	0,18	0,08	0,10	0,14	0,19		
$Cv v _{bas}(2)$	0,13	0,24	0,12	0,18	0,27	0,22	0,19	0,11		

Таблица 1. Гидрографические характеристики речных бассейнов в 1946-2005 гг.*

 $W_{bas}(1)$ – годовой объём стока, км³; $dW_{bas}(1)$ – изменение $W_{bas}(1)$ в 1976–2005 гг. относительно предыдущего интервала времени, %; $W_{bas}(2)$ – объём стока за вегетационный период (апрель–сентябрь), км³; $dW_{bas}(2)$ – изменение $W_{bas}(2)$ в 1946–2005 гг., %; Cv – коэффициент вариации; Σ – сумма чисел; *Mean* – среднее, выделено жирным шрифтом. **В числителе – интервал 1946–1975 гг., в знаменателе – 1976–2005 гг.

Таблица 2. Изменение характеристик оледенения речных бассейнов по данным Каталогов [1-3]*.

Поромотри	Речные бассейны на Северном Кавказе								
Параметры	Баксан	Малка	Теберда	Терек, верховье	Чегем	Черек	Z/Mean	г. катунь	
N _{gl}	$\frac{101^{**}}{101}$	8	<u>67</u> 62	<u>86</u> 60	$\frac{35}{43}$	$\frac{160}{97}$	<u>457</u> 371	<u>771</u> 964	
F _{gl}	$\frac{154,2}{140,2}$	$\frac{57,3}{52,3}$	$\frac{57,6}{48,2}$	$\frac{66,6}{46,0}$	$\frac{59,3}{49,5}$	$\frac{198,1}{152,2}$	$\frac{593,1}{488,3}$	$\frac{737,8}{524,8}$	
$F_{gl}/F_{bas},$ %	7,3 6,7	$\frac{3,7}{3,4}$	$\frac{11,4}{9,6}$	4,5 3,1	8,0 6,7	$\frac{14,7}{11,3}$	<u>-8,3</u> 6,8	$\frac{1,3}{1,0}$	
$dF_{gl}, \%$	-9,1	-8,7	-16,4	-30,9	-16,5	-23,2	-18,1	-29,0	

 $*N_{gl}$ – число ледников; F_{gl} – площадь ледников в бассейне, км²; dF_{gl} – изменение площади оледенения в 1946–2005 гг., %; Σ – сумма чисел; *Mean* – среднее, выделено жирным шрифтом. **В числителе – информация из источника [1] для всех бассейнов, кроме Катуни, для которого источник [2], в знаменателе – из источника [3]. Для источников [1], [2] интервал 1946–1975 гг., для [3] – 1976–2005 гг.

гидрологических справочников и ежегодников. Пропуски в рядах по стоку восстановлены с помощью линейных связей с гидропостами-аналогами за совместный период наблюдений. Площадь оледенения в отдельных речных бассейнах для интервала 1946—1975 гг. взята из Каталогов [1, 2], а для 1976—2005 гг. получена после привязки данных Каталога [3] к границам водосборных площадей выше замыкающих гидропостов. Общая площадей выше замыкающих гидропостов. Общая площадь ледников в бассейне Терека, по данным [1], составляла 699,4 км², а в шести бассейнах, выбранных для исследования, — 593 км², т.е. 84,8%, что обеспечивает региональный масштаб постановки проблемы и результатов её решения.

В результате анализа материалов табл. 1 и 2 установлены следующие особенности многолет-

ней динамики водных ресурсов в двух регионах. 1. На Северном Кавказе в четырёх случаях из шести отмечается увеличение объёма годового стока W_{bas}(1) в 1976-2005 гг. относительно предыдущего 30-летнего интервала. Объём стока за вегетационный период W_{has}(2) изменялся синхронно с годовым. В бассейне р. Катунь отмечается уменьшение объёмов годового и вегетационного стока и их изменчивости. 2. В бассейнах рек на Северном Кавказе, в отличие от Катуни, преобладало увеличение коэффициента вариации в 1976-2005 гг. 3. Во всех рассматриваемых бассейнах с различной скоростью произошло сокращение площади оледенения. 4. Выявленный характер динамики стока невозможно объяснить какой-либо единственной причиной, на-



Рис. 1. Сток в бассейнах рек Северного Кавказа и характеристики климата. *a* – средний за год (*1*–*6* бассейны рек): *1* – Теберда, *2* – Терек (верховье), *3* – Малка, *4* – Баксан, *5* – Чегем, *6* – Черек; *7* – суммарный сток шести рек;

 δ – средний за апрель-сентябрь (1-6 бассейны рек): 1 – Теберда, 2 – Терек (верховье), 3 – Малка, 4 – Баксан, 5 – Чегем, 6 – Черек; 7 – суммарный сток шести рек;

в – суммарный сток шести рек (список рек в подписи к рис. 1, а): 1 – сток за апрель–сентябрь; 2 – сток за год; средняя летняя температура воздуха на метеостанциях: 3 – Сулак высокогорная (2927 м), 4 – Терскол (2214 м), 5 – Теберда (1313 м), 6 – Кисловодск (890 м), 7 – Владикаказ (668 м);

е – суммарный сток шести рек (список рек в подписи к рис. 1, а): 1 – сток за год;
2 – сток за апрель-сентябрь; сумма осадков за год на метеостанциях: 3 – Кисловодск, 4 – Теберда, 5 – Терскол; сумма осадков за октябрь-март на метеостанциях: 6 – Кисловодск, 7 – Владикавказ, 8 – Теберда, 9 – Терскол

Fig. 1. Runoff in the river basins of Northern Causacus and climate characteristics.

a – annual runoff (1-6 – river): 1 – Teberda, 2 – Terek (upstream), 3 – Malka, 4 – Baksan, 5 – Chegem, 6 – Cherek ; 7 – total runoff of the six rivers;

 δ - runoff for April–September (1–6 - river): 1 - Teberda, 2 - Terek (upstream), 3 - Malka, 4 - Baksan, 5 - Chegem, 6 - Cherek; 7 - total runoff of the six rivers;

e – total runoff of six rivers in the Northern Caucasus (list of rivers see in the caption to the fig. 1 *a*): *1* – runoff for April–September; 2 – runoff for year; mean summer air temperature on meteostations: 3 – Sulak vysokogornaya (2927 m), 4 – Terskol (2214 m), 5 – Teberda (1313 m), 6 – Kislovodsk (890 m), 7 – Vladikavkaz (668 m);

e – total runoff of six rivers in the Northern Caucasus (list of rivers see in the caption to the fig. 1 *a*): *1* – runoff for year; *2* – runoff for April–September; sum of precipitation for year on meteostations: *3* – Kislivodsk; *4* – Teberda; *5* – Terskol; sum of precipitation for October–March: *6* – Kislovodsk; *7* – Vladivkaz; *8* – Teberda; *9* – Terskol



пример, сокращением площади оледенения. Для этого необходим совместный анализ многолетних изменений климатических факторов стока (годовых и сезонных величин осадков, температур воздуха и испарения).

Пространственно-временно́е изменение годового и вегетационного (апрель–сентябрь) стока рек и его климатических факторов на Северном Кавказе в 1946–2005 гг. иллюстрирует рис. 1. Как видно, с 1976–1985 гг. на высоте более 2000 м над ур. моря (все высоты в статье даны в м над ур. моря) на метеостанциях отмечается устойчивый, синхронный рост средней летней температуры воздуха T_s (VI–VIII) и осадков за октябрь–март P_s (X–III) и год P_y (I–XII), что обусловило увеличение W_{bas} (1) и W_{bas} (2) в дальнейшем, несмотря на сокращение площаРис. 2. Сток р. Катунь (гидропост Сростки) и характеристики климата. a -сток за год (6) и апрель-сентябрь (5) и средняя летняя температура воздуха на метеостанциях (1-4): 1 – Усть-Кокса (977 м), 2 – Кошагач (1759 м), 3 – Актру (2130 м), 4 – Каратюрек (2601 м); δ – сток за год (1) и апрель-сентябрь (2);

 b – сток за тод (7) и апрель–сентяюрь (2),
 годовые (на метеостанциях: 3 – Усть-Кокса, 4 – Каратюрек) и сезонные осадки
 за апрель–сентябрь (на метеостанциях: 5 – Усть-Кокса, 6 – Каратюрек)

Fig. 2. Runoff of the Katun River (hydrological site Srostki) and climate characteristics.

a – runoff for year (6) and April–September (5); mean summer air temperature on (1– 4): 1 – Ust-Koksa (altitude 977 m), 2 – Koshagach (1759 m), 3 – Aktru (2130 m), 4 – Karatyurek (2601 m);

 δ – runoff for year (1) and April–September (2); yearly precipitation (on meteostations: 3 – Ust-Koksa, 4 – Karatyurek) and seasonal precipitation for April–September (on meteostations: 5 – Ust –Koksa, 6 – Karatyurek

ди оледенения в шести бассейнах на 104,7 км². В отличие от рек Северного Кавказа, в бассейне р. Катунь (рис. 2) также с 1976–1985 гг. происходило сокращение объёмов $W_{bas}(1)$ и $W_{bas}(2)$ на фоне стабильного увеличения $T_s(VI-VIII)$ на высотах от 1000 до 2600 м и сокращения площади ледников на 213,0 км² (см. табл. 2). При этом коэффициент корреляции $W_{bas}(1)$ и $W_{bas}(2)$ с $T_s(VI-VIII)$ на метеостанциях Усть-Кокса (977 м), Кошагач (1759 м), Актру (2150 м), Каратюрек (2601 м) составил от -0,59 до -0,74. Пригодные для анализа суммы осадков за год $P_y(I-XII)$ и апрель–сентябрь $P_s(IV-IX)$ оказались доступны по объективным причинам [6] с 1966 г. Тенденции многолетнего изменения стока $W_{bas}(1), W_{bas}(2)$ и его климатических факторов – $P_y(I-XII), P_s(IV-IX), T_s(VI-VIII) – в$ бассейнах рек Северного Кавказа (см. рис. 1) и р. Катунь (см. рис. 2), а также предварительный корреляционный анализ этих переменных указывают на возможность получения регрессионных уравнений для описания динамики годового и/или вегетационного стока.

Представленная во введении картина современной пространственно-временной динамики гидрологических и гляциологических характеристик в бассейнах рек Северного Кавказа и р. Катунь служит основанием для разработки и решения следующих задач: а) уточнения и совершенствования информационно-методической основы региональных расчётов стока рек снегово-ледникового типа питания; б) оценки изменения в 1946-2005 гг. составляющих гидрологического цикла (осадки, испарение, ледниковый сток) на площади оледенения в рассматриваемых речных бассейнах; в) обобщения сведений по качеству исходной гляциологической и гидрологической информации; г) верификации составляющих уравнения (1) путём сравнения измеренного речного стока и рассчитанного по уравнению годового водного баланса (1) в целом для бассейна. Различные методы получения перечисленных переменных позволят найти для них оптимальный вариант. В масштабе крупных водосборов, включающих в себя десятки и сотни ледников, решение поставленных задач несомненно имеет научно-прикладной интерес.

Методика

Для рек снегово-ледникового питания связь между составляющими годового гидрологического цикла (сток, осадки, испарение) выражает следующее уравнение водного баланса речного бассейна:

$$R = K_R(P - E + W_{gl}) + \Delta W, \, \mathrm{KM}^3 \tag{1}$$

где R — речной сток на гидростворе; K_R — коэффициент трансформации в сток объёма воды, поступившей на поверхность бассейна; P — осадки; E — испарение с деятельной поверхности водосбора; W_{gl} — сток от таяния многолетних запасов льда и фирна возрастом более одного года; ΔW динамические запасы воды в бассейне.

Применение коэффициента K_R обусловлено тем, что алгебраическая сумма $P - E + W_{gl}$ представляет собой «климатический сток», отлича-

ющийся от измеренного на гидростворе на величину выклинивания подземных вод и баланса антропогенного водозабора и сброса стока. В уравнении (1) многолетний ряд объёмов стока R – характеристика, непосредственно измеряемая на гидрологических створах, замыкающих площадь бассейна F_{bas} , на которой формируется сток. Площадь F_{has} используется также при определении объёмов осадков и испарения. Часть площади оледенения в бассейне, на которой происходит таяние многолетнего льда и фирна, меняется каждый год в зависимости от абсолютной высоты нулевого баланса процессов аккумуляции и абляции. Для расчётов по уравнению (1) среднего многолетнего объёма стока за 1946-1975 и 1976-2005 гг. в соответствии с материалами наблюдений принято, что W_{gl} на площади от конца ледника до средней высоты границы фирнового питания формируется на Северном Кавказе в течение мая-сентября [7-9], а в бассейне р. Катунь – в июне–августе [10, 11].

Проблема определения и пространственновременного анализа составляющих уравнения (1) содержит информационные, методические и прикладные аспекты, которые рассмотрены далее. Для определения составляющих P, E, W_{al} и ΔW будем применять разные методы расчёта. Так, на основании слабой многолетней изменчивости меженного стока его объём в течение января—марта приравнен к величине ΔW в уравнении (1). Входной информацией для расчёта W_{al} служат в основном данные стандартных измерений температуры воздуха, упругости водяного пара в воздухе и осадков на сети метеорологических станций, содержащиеся в справочниках и ежемесячниках Росгидромета [6], а также материалы по морфометрии ледников в Каталогах [1-3]. Все дополнительные параметры, необходимые для расчётов W_{gl} , P, T, E, определяются заранее и составляют часть входной информации.

Модель ледникового стока W_{gl} . Методической основой для определения W_{gl} служит упрощённый для средних многолетних условий вариант физико-статистической модели РЕГМОД процессов аккумуляции и абляции снега и льда в гляциальных областях, подробно рассмотренный в работах [12–15]. Упрощение состоит в использовании для расчёта W_{gl} осреднённых за общий интервал времени многолетних значений климатических факторов речного стока и высот-

но-площадных характеристик ледников. Далее приведены основные расчётные выражения, использованные в модели, и даны оценки их качества. Учитывая линейный характер связи между слоем таяния и высотой над уровнем моря [12], запишем в общем виде уравнения для определения годовых/сезонных объёмов ледникового стока, который образуется в областях абляции V_{ab} и аккумуляции V_{ac} в интервалах высот $Z_e - Z_{uml}$, $Z_{uml} - Z_{fg}$ и $Z_{fg} - Z_b$, где Z_e и Z_b – соответственно высоты конца и начала ледника, Z_{uml} – верхний уровень распространения сплошного моренного покрова, Z_{fe} – высота фирновой границы:

$$V_{ab} = [M_2(\widetilde{Z}_{mor})F_{mor} + M_1(\widetilde{Z}_{ice})F_{ice}]K_R(ab);$$
(2)

$$V_{ac} = M(\tilde{Z}_{ac})F_{ac}K_R(ac), \qquad (3)$$

где $M_2(\tilde{Z}_{mor}), M_1(\tilde{Z}_{ice})$ и $M(\tilde{Z}_{ac})$ – соответственно слои таяния на средневзвешенных высотах для площади сплошной морены F_{mor} , открытого льда F_{ice} и области аккумуляции F_{ac} ; $K_R(ab)$ и $K_R(ac)$ – коэффициенты стока из областей абляции и аккумуляции; $F_{ab} = F_{mor} + F_{ice}$ и F_{ac} – соответственно площади областей абляции и аккумуляции.

Оценка пространственно-временного изменения W_g в районе исследования выполнена с учётом колебаний размеров F_{mor} и F_{ice} в течение 1946—2005 гг. Для расчёта $M_2(\tilde{Z}_{mor})$ и $M_1(\tilde{Z}_{ice})$ в большинстве случаев используется параметризация уравнения теплового баланса таяния поверхности ледника в виде однофакторной M = M(T) или двухфакторной $M = M(B_s, T)$ эмпирических зависимостей, где B_s и T - соответственно средние значения поглощённой коротковолновой солнечной радиации и температуры воздуха за характерные интервалы времени (сутки, декада, месяц, сезон). Наиболее приемлемыми для моделирования ледникового стока считаются [12, 16] формулы M = M(T)и $M = M(B_{c}, T)$ с параметрами, изменяющимися в пространстве и времени. При этом интенсивность таяния М определяется отдельно для снежной и ледовой поверхностей. Эмпирические формулы M = M(T) и $M = M(B_s, T)$ на основе репрезентативных выборок измерений М, В, и Т получены [12] для территории Центральной Азии и успешно использованы [12-15] при моделировании ледникового стока в бассейнах рек Тянь-Шаня, Памира и на северном склоне Заилийского Алатау.

На Северном Кавказе отсутствует необходимое число измерений для оценки распределённых параметров в формулах M = M(T) и $M = M(B_s, T)$, поэтому по данным наблюдений на леднике Марух [8] было получено следующее уравнение:

$$M = a/(b+T), \tag{4}$$

где a и b – эмпирические параметры; для льда $a_i = -153,2$ и $b_i = -12,7$; для снега $a_s = -150,2$ и $b_s = -12,1$.

Верхний предел Т для расчёта интенсивности таяния льда составляет 12,7 °С, а для снега равен 12,1 °C. Нижний предел и в том, и другом случаях — любая отрицательная температура воздуха, возможная на Земле. Таким образом, формула (4) пригодна для любого диапазона температуры воздуха на ледниках Северного Кавказа, чем она выгодно отличается от других [16] подобных выражений. Аналогичная по структуре (4) формула M = M(T) с параметрами a = -145,0 и b = -11,0 получена по данным [17] для расчёта интенсивности таяния льда в бассейне р. Катунь. При моделировании и расчётах ледникового стока в этом бассейне испытана также разработанная ранее [12] формула с распределённым параметром В:

$$M(Z, T) = [\alpha T(Z, \phi, \lambda) + \beta(Z, \phi, \lambda)] 10,$$
 (5)
мм слоя воды/сутки,

где $\alpha \sim \text{const} = 0,57$; *Z* – высота, км; ϕ , λ – географические координаты (широта, долгота);

$$\beta(Z, \varphi, \lambda) = 0.26Z - 0.33\varphi + 0.09\lambda + 6.72.$$
(6)

По материалам измерений температуры воздуха на 17 метеостанциях, расположенных на Северном Кавказе (СК) в диапазонах высоты 134–3680 м, 40,2–47,75 в.д. и 41,47–44,98 с.ш., получены формулы для определения средней температуры T за год (I–XII) и май–сентябрь (V–IX) как функции высоты местности Z (м):

$$T_{\rm I-XII}(\rm CK) = 12,16 - \gamma_1 Z;$$
 (7)

$$T_{\rm V-IX}({\rm CK}) = T_{Z_0} - \gamma_2 (Z - Z_0),$$
 (8)

где γ_1 — вертикальный градиент температуры воздуха для I—XII, равен 0,0043 °С/м; γ_2 = вертикальный градиент температуры воздуха для V—IX, равен 0,0052 °С/м; T_{Z_0} – температура воздуха в мае сентябре на базовой метеостанции с высотой Z_0 .

Коэффициент детерминации выражений (7) и (8) равен соответственно 0.94 и 0.97. Различие между (7) и (8) состоит в том, что формула (8) позволяет учесть многолетние изменения температуры воздуха на базовой метеостанции. В частности, по результатам корреляционного анализа поля температуры воздуха таким пунктом для моделирования стока рек Северного Кавказа принята м/с Сулак высокогорная ($Z_0 = 2927$ м), а для бассейна р. Катунь (К) – м/с Каратюрек $(Z_0 = 2601 \text{ м})$. Согласно [10, 11], характерная средняя продолжительность летнего периода абляции на ледниках в верховьях р. Катунь составляет примерно 90-100 дней, поэтому для расчёта средней *Т* за июнь–август (VI–VIII) получены: формула (9) для 1946—1975 гг. (K₁) —

 $T_{\rm VI-VIII}(\rm K_1) = 18,3 - 0,0044Z$ и (9)

формула (10) для 1976-2005 гг. (К₂) -

$$T_{\rm VI-VIII}(\rm K_2) = 18.9 - 0.0044Z$$
 (10)

с коэффициентами детерминации соответственно 0,90 и 0,89. В данном случае использованы сведения из базы данных ВНИИГМИ [6] для шести метеостанций в диапазонах высоты 324– 2601 м, 85,62–88,68 в.д. и 50,00–51,90 с.ш. По данным из [6], средняя за май–сентябрь температура воздуха в 1946–1975 и 1976–2005 гг. на м/с Сулак высокогорная была равна соответственно 6,0 и 6,6 °С, а на м/с Каратюрек за июнь– август и те же интервалы лет – 5,5 и 5,9 °С.

Определение интенсивности таяния льда под мореной выполняется по универсальной формуле $M_{mor} = M_{ice}f(h_c)$, где $f(h_c)$ – безразмерная функция ослабления таяния под покровом морены, имеющая в интервале $0 < h_c < 2$ см максимум и две характерные точки, в которых $f(h_c) = 1$. Практические расчёты $f(h_c)$ упрощаются путём применения ранее полученных [13, 14] выражений:

формула (11) для морены толщиной от 0 до 2 см -

$$f(h_c)_1 = 0.15h_c^3 - 0.56h_c^2 + 0.43h_c + 1.00 \text{ M}$$
(11)

формула (12) при толщине h_c более 2 см –

$$f(h_c)_2 = 1.5 h_c^{-0.62}.$$
 (12)

Вычисление среднего слоя морены \overline{h}_c на высоте

$$\widetilde{Z}_{mor} \approx (Z_e + Z_{uml})0,5 \tag{13}$$

выполняется по формуле

$$\overline{h} = H_c(Z_\rho)0,5.$$
(14)

В формулах (13) и (14) Z_{uml} – верхний уровень распространения сплошного моренного покрова, а $H_c(Z_e)$ – толщина морены на конце ледника Z_e . Определение $H_c(Z_e)$ основано на региональной зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$, где Ω – отношение площадей сплошного моренного покрова и области абляции. В качестве численной аппроксимации зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$ получено [13, 14] эмпирическое выражение

$$H_c(Z_{\rho}) = 88\Omega, \,\mathrm{cm}.\tag{15}$$

Коэффициент корреляции для зависимости (15) равен 0,97. Информация для определения Ω содержится в Каталогах [1, 2]. В результате летних снегопадов в течение принятых расчётных периодов (май—сентябрь и июнь—август) продолжительность процесса таяния ледников $N(\tilde{Z}, \varphi, \lambda)$ сокращается на число дней N_{sm} выпадения и таяния снега в области абляции на высоте \tilde{Z} . Определение N_{sm} в модели ледникового стока выполняется на основе региональных зависимостей осадков от высоты местности, географических координат (приведены далее) и формулы (4) или (5).

Расчёт осадков и испарения. В отличие от температуры воздуха поле осадков Р, особенно в горах, может иметь достаточно сложный характер, что затрудняет получение региональных зависимостей для надёжного описания пространственно-временных изменений Р и, в конечном счёте, отражается на сходимости правой и левой частей уравнения (1). Это замечание, прежде всего, относится к бассейну р. Катунь, где на площади 58,4 тыс. км² выделено [18] несколько высотных поясов с различными условиями накопления осадков. К счастью, подобная неопределённость не свойственна полю упругости водяного пара в воздухе, которая используется при определении объёма испарения с поверхности речного бассейна. Как показано в [12–15], общий вид формулы для расчёта объёма осадков Р, испарения Е и других переменных как одномерных функций высоты местности Z в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$ следующий:

$$X_z = x(\tilde{z})F\tag{16}$$

или для среднего значения $\overline{x} = x(\tilde{z})$, где \tilde{z} – средневзвешенная высота над ур. моря в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$; F – площадь в этом же интервале.

В формуле (16) сомножитель $x(\tilde{z})$ может быть представлен как линейная или квадратичная функция одного аргумента Z или нескольких (Z – высота; географические координаты: широта – lat, долгота – long). Если функция x(Z) или x(Z, lat, long)используется для пространственно-временной экстраполяции зависимой переменной, то в неё добавляют известные значения функции в опорных пунктах – $x(Z_0)$ или $x(Z_0, lat_0, long_0)$. Например, для квадратичной зависимости $x = x(Z, Z^2)$:

 $x(Z) = x(Z_0)[1 + k_1(Z - Z_0) + k_2(Z - Z_0)^2],$

где k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты.

Соответствующие выражения с конкретными эмпирическими коэффициентами неоднократно (см., например, [12—15]) использовались для расчётов многолетних рядов стока рек снегово-ледникового питания в бассейнах притоков Амударьи и Сырдарьи.

С целью определения слоя осадков за майсентябрь P_{V-IX} и год P_{I-XII} в рассматриваемых бассейнах рек Северного Кавказа по данным [6] получены следующие рабочие формулы:

 $P_{\text{I-XII}}(\text{CK}) = 0,195\text{Z} + 430, \text{ MM}; \tag{17}$

$$P_{\rm V-IX}(\rm CK) = 0,019Z + 60, \,\rm MM.$$
(18)

Коэффициент детерминации для выражения (17) равен 0,65, а для (18) – 0,82.

Одномерные эмпирические формулы (19) и (20), также установленные по данным [6], были использованы для расчёта годовых и летних осадков (июнь—август) в высокогорном поясе бассейна р. Катунь:

 $P_{\rm VI-VIII}(\rm K) = 0,059Z + 117, \, \rm MM;$ (19)

 $P_{\rm I-XII}(\rm K) = 0,59Z - 844, \, \rm mm.$ (20)

Коэффициент детерминации для выражений (19) и (20) соответственно равен 0,71 и 0,73.

Несомненно, региональное поле осадков имеет более сложный многофакторный характер. Пространственная репрезентативность функций P = P(Z) и P = P(Z, lat, long) может быть установлена апостериори после их использования для моделирования и расчёта годового и вегетационного стока в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая. Общий вид формул для определения объёма испарения E_v (км³/сезон) на площади области абляции таков:

$$E_{v} = E(\tilde{Z})F_{ab},\tag{21}$$

где:

$$E(\tilde{Z}) = PE \operatorname{th}[P_s(\tilde{Z})/PE(\tilde{Z})]; \qquad (22)$$

$$P_s(\tilde{Z}) - M(\tilde{Z}) = 0; (23)$$

$$PE = 0,0018[25 + T_s(\tilde{Z})^2(100 - r(\tilde{Z})];$$
(24)

$$e_n(\bar{Z}) = 6, 1 \cdot 10^{\left[\frac{7,45T_s(\tilde{Z})}{235+T_s(\tilde{Z})}\right]};$$
(25)

$$r(\widetilde{Z}) = e_p(\widetilde{Z})/e_n(\widetilde{Z}), \qquad (26)$$

где E – суммарный слой испарения, мм; \tilde{Z} – средневзвешенная высота в интервале $Z_e \div Z_{fg}$; F_{ab} – площадь области абляции; T_s – средняя за V–IX/VI–VIII температура воздуха; PE – наибольшая возможная величина испарения при данных условиях увлажнения; P_s – сезонная сумма осадков; $M(\tilde{Z})$ – слой абляции/таяния за соответствующий интервал времени.

Формула (22) – известное уравнение Ольдекопа для расчёта испарения, где th - гиперболический тангенс; (23) – уравнение баланса аккумуляции и абляции на высоте \tilde{Z} ; (24) — формула Романенко [19] для расчёта наибольшей возможной величины испарения РЕ при данных условиях увлажнения, мм/месяц; (25) – формула Магнуса для расчёта насыщенного парциального давления водяного пара e_n при данной температуре воздуха; (26) – выражение для определения относительной влажности воздуха. Для вывода региональных зависимостей парциального давления водяного пара в воздухе от высоты $e_n(Z)$ использованы наблюдения метеостанций, расположенных на Северном Кавказе и в бассейне р. Катунь.

Определение объёмов испарения и составляющих ледникового стока выполнено с учётом временно́го изменения в 1946–1975 и 1976–2005 гг. средних значений температуры воздуха T и упругости водяного пара в воздухе e на высоте Z_0 за год и сезоны V–IX и VI–VIII. Таким образом, рассматриваемый метод включает в себя: а) уравнения (7) и (8) для моделирования сезонного стока от таяния снега и льда в областях аккумуляции и абляции ледников; б) комплекс расчётных формул для определения осадков, температуры и упругости водяного пара в

воздухе, интенсивности таяния льда под мореной и открытого льда, испарения в интервалах высот $Z_e \div Z_{uml}$, $Z_{uml} \div Z_{fg}$, и $Z_{fg} \div Z_b$ на ледниках.

Исходные данные

Исследование и расчёт составляющих водного баланса на Северном Кавказе и Алтае выполнены на основе гляциологических, гидрологических и климатических исходных данных. Гидрографические характеристики речных бассейнов, содержащиеся в табл. 1, и многолетние ряды средних месячных значений стока на гидропостах были подготовлены для анализа по материалам работ [20-23]. Для пространственной экстраполяции осадков, температуры и упругости водяного пара в воздухе необходимы многолетние ряды метеорологических наблюдений в опорных пунктах и соответствующие эмпирические параметры. В нашей работе основной источник месячных метеорологических данных - это база данных ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета [6].

Гляциологическая информация. Опыт использования моделей для региональных расчётов ледникового стока [12-15] показал, что минимальный набор входной информации должен содержать: а) географические координаты ледников (долгота *long*, широта *lat*); б) площади: ледника в целом F_{gl} , областей аккумуляции F_{ac} и абляции F_{ab} , льда под сплошной мореной F_{mor} , открытого льда F_{ice} ; в) высоты: начала Z_b и конца ледника Z_e , фирновой границы Z_{fg} ; г) толщину морены на конце ледника $H_{c}(Z_{\rho})$; д) функцию распределения площади ледника в зависимости от высоты местности $F_{gl}(Z)$. Источником однократных региональных данных о долготе, широте, F_{gl} , F_{mor} , Z_b , Z_e , Z_{fg} , $F_{gl}(Z)$ служат справочники [1, 2], характеризующие состояние ледников 50-60 лет тому назад. Для определения параметров F_{ac} , F_{ab} , $H_c(Z_e)$ были разработаны [12–14] расчётные формулы. Поскольку сведения о ежегодных изменениях F_{gl} , Z_b , Z_e , Z_{fg} доступны [24] только для двух ледников Северного Кавказа (Гарабаши, Джанкуат) и частично для группы четырёх ледников Актру на Алтае, единственная возможность моделирования ледникового стока с учётом динамики оледенения на рассматриваемой территории заключается в совместном использовании Каталогов [1-3]. С целью унификации набора морфометрических параметров и обеспечения их сравнения данные в [1–3] были подвергнуты дополнительной обработке.

Так, корректировка изменения площади ледников в 1946-2005 гг. в соответствии с фоновой тенденцией сокращения площади оледенения на Северном Кавказе [4] была выполнена путём повторной оцифровки контуров ледников на географически привязанных картах 1983-1987 гг. масштаба 1:100 000 для получения шейп-файла контура и нового определения средствами ArcGIS площади ледника в Каталоге [1] в случаях: а) если разность F_{al} в [1] и [3] превышает максимальную по модулю скорость годового сокращения F_{gl} в конкретном бассейне и больше предельной ошибки измерения площади $(0,2 \text{ км}^2)$ для F_{al} , начинающихся с 0,5 км²; б) если при сравнении [1] и [3] вместо сокращения получается прирост площади, а также для данных, сомнительных по экспертной оценке. Сравнение контуров ледников из [3] с границами их изображений на картах масштаба 1:100 000, подготовленных в 1983-1987 гг., показало, что эти карты вполне пригодны для корректировки площадей в [1]. Средняя абсолютная ошибка определения исправленной площади *F_{gl}* такая, как и в Каталоге [1], т.е. 0,1 км². Эта работа выполнена для 75 ледников в шести речных бассейнах Северного Кавказа. В итоге достигнуто соответствие между откорректированными значениями F_{gl} в [1] и региональной тенденцией динамики ледников по сведениям из [4]. Аналогичная корректировка *F*_{gl} не выполнена для бассейна р. Катунь из-за нестыковки способов идентификации ледников в [2] и [3].

Одно из характерных свойств региональной динамики оледенения в 1946—2005 гг. — увеличение площади моренного покрова на ледниках и соответственно уменьшение площади открытого льда, что, при прочих равных условиях, приводит к снижению объёма ледникового стока. Изменение числа ледников N_{gl} в табл. 2 на Северном Кавказе в целом согласуется с сокращением площади, хотя в отдельных случаях на этот показатель влияет распад ледников.

Из формул (2) и (3) следует, что опорными точками на ледниках для расчёта объёмов таяния льда под мореной, открытого льда, старого фирна и летнего снега служат средневзвешенные высоты \tilde{Z} для интервалов $Z_e \div Z_{uml}$, $Z_{uml} \div Z_{fg}$, $Z_e \div Z_{fg}$, и $Z_{fg} \div Z_b$. Значения высот на границах перечисленных интервалов, как часть входной информации, используемой для определения \tilde{Z} , есть в Каталогах [1, 2]. Величины площадей F_{ab} , F_{mor} , F_{ice} получены по следующим выражениям:

$$F_{ab} = F_{gl} 0.5 \left\{ 1 + \tanh \frac{Z_{fg} - 0.989 Z_{fg} - 0.049}{0.486 F_{gl}^{0.486}} \right\}; \quad (26a)$$

$$F_{mor} = F_{ab} - F_{open}; \tag{27}$$

$$F_{ice} = F_{gl} - F_{mor}.$$
 (28)

Эмпирическая формула (26а), предложенная в работе [25], описывает гиперболическим тангенсом распределение площади ледника по высоте. Из неё следует, что высота фирновой границы Z_{fo} зависит от доли площади абляции в общей площади ледника F_{al}. При равенстве площадей абляции и аккумуляции получаем высоту фирновой границы Z_{fg} на ледниках по методу Куровского. В печатной версии Каталогов [1, 2] для ограниченного числа ледников приведены значения Z_{fg} , полученные методами Куровского, Гефера, Гесса и наземно-визуального определения. Позже, в электронной версии Каталога ледников СССР высота Z_{fg} задана как среднеарифметическое между Z_{max} и Z_{min}. Эти параметры также косвенно характеризуют динамическое состояние оледенения. В частности, при сокращении площади активной части ледника Z_{min} растёт, а Z_{max} остаётся постоянной или увеличивается. Сравнение разности Z_{max} – Z_{min} для бассейнов рек Северного Кавказа по данным [1, 3] с учётом качества определения высот показало обусловленное сокращением площади уменьшение разности Z_{max} – Z_{min} в 1976– 2005 гг. относительно 1946-1975 гг. Абсолютные ошибки высот Z_{max} , Z_{min} , Z_{fg} , Z_{med} в Каталогах [1–3] зависят от квалификации исполнителей, масштаба топографической основы, горизонтального и вертикального разрешения цифровой модели рельефа. Обобщённая по различным источникам среднеквадратичная ошибка определения высоты в [1-3] составляет 10-20 м.

Для расчёта F_{mor} по формуле (27) используется параметр F_{open} из Каталогов [1, 2]. Поскольку в Каталоге [3] отсутствуют характеристики моренного покрова (площадь F_{mor} , высота верхней границы Z_{uml}), для определения Z_{uml} (м над ур. моря) на заморененных ледниках по данным [1] получено выражение

$$Z_{uml} = 0.94Z_e + 223.0. \tag{29}$$

Коэффициент детерминации равен 0,97; среднеквадратичная ошибка расчёта — 70 м. Параметр Z_{uml} используется при определении по формулам (14) и (15) средней толщины морены в интервале высоты $Z_{uml} - Z_e$ на ледниках в Каталоге [3]. Расчёт площади морены в Каталоге [3] для ледников Северного Кавказа выполнен по выражению

$$F_{mor}[3] = F_{mor}[1] + F_{mor}[1]dV_{mor}\Delta N, \qquad (30)$$

где dV_{mor} — средняя скорость прироста площади морены; ΔN — интервал времени в годах между данными Каталогов [1] и [3].

По материалам многолетних наблюдений на леднике Джанкуат [26], величина dV_{mor} принята равной 0,26 %/год. Повсеместное увеличение во второй половине XX в. площади моренного покрова на ледниках, влияющее в региональном масштабе на уменьшение объёма W_{gl} , подтверждается данными для Памиро-Алая (табл. 3), Гиндукуша и Гималаев [27]. Эта таблица подготовлена по данным работы [25]. Величина толщины морены на концах ледников $H_c(Z_e)$ в этой таблице рассчитана по формуле (15).

Качество моделирования ледникового стока

Ошибки промежуточных и конечных результатов расчёта по уравнениям (2)–(26) зависят, во-первых, от полноты и адекватности использованных математических моделей и, во-вторых, от пригодности исходной климатической и гляциологической информации для описания планово-высотных изменений целевых функций. В связи с ограниченностью климатических данных в высокогорных речных бассейнах одномерная модель процесса ледникового стока в настоящее время — оптимальный метод расчёта объёма *W*_{gl} для совокупностей ледников. Обоснованием определения слоёв таяния/осадков/ испарения на средневзвешенной высоте для заданной площади с помощью формул (7)-(10) и (17)-(21) служит теорема о среднем значении произведения произвольных функций f(x)g(x) в интегральном исчислении. Согласно этой теореме, в непрерывном распределении f(x) существует точка f(c), которая обеспечивает определение интеграла произведения f(x) и g(x), т.е.

Речные бассейны	Ngl	Ngl.mor	Fgl	$H_c(Z_e)$	Fmor	Fmor.oth	v(Fmor)
	1980 a	г. (числитель)), 1957 г. (знамен	атель)			1980—1957 гг.
Гунт	978/993	114/23	882,2/535,7	8/1	19,6/4,3	25,6/16,2	0,39
Обихингоу	675/689	163/111	705,1/810,2	30/16	117,6/69,7	32,7/20	0,53
Сурхоб	690/715	80/53	358,8/404,2	16/13	31,7/29,0	29,7/21,8	0,33
Шахдар	379/369	43/11	166,7/216,3	10/2	10,0/2,9	27,6/16,1	0,48
	1980—1954 гг.						
Ванч	308/386	116/84	291,6/344,8	36/27	57,6/48,6	38,8/29,3	0,35
Язгулем	322/374	126/121	262,7/330,4	47/31	68,6/55,9	41,3/29,4	0,44
	1980 a	г. (числитель)), 1966 г. (знамен	атель)			1980—1966 гг.
Бартанг	1089/969	219/70	931,9/1087,2	19/8	99,5/52,3	33,2/20,6	0,84
Мургаб	942/879	52/17	450,2/561,2	5/1	13,5/3,9	24,4/11,7	0,85
Муксу	995/904	107/55	1239,1/1271,9	14/6	96,0/39,9	20,5/10,5	0,67
Восточный Кызылсу	403/395	71/62	486,4/527,3	20/15	55,3/45,1	22,4/18,3	0,27

Таблица 3. Характеристики моренного покрова на ледниках Памиро-Алая*

 $*N_{gl}$ – число ледников; $N_{gl.mor}$ – число ледников с мореной; F_{gl} – площадь ледников, км²; $H_c(Z_e)$ – толщина морены на конце ледника, см; F_{mor} – площадь морены, км²; $F_{mor.oth}$ – относительная площадь морены; $v(F_{mor})$ – средняя скорость прироста площади морены за разность лет, %/год.

$$\int_{a}^{b} f(x)g(x)dx = f(c)\int_{a}^{b} g(x)dx,$$
(31)

где *с* содержится в [*a*, *b*]. В нашем случае f(x) символизирует пространственное распределение слоя заданной переменной; f(c) – значение этой переменной на средневзвешенной высоте в интервале [*a*, *b*] или между минимальной и максимальной высотами $Z_{max} - Z_{min}$, а определённый интеграл функции g(x) соответствует площади, на которой вычисляется объём стока/осадков/ испарения. Очевидно, формулу (31) можно считать инвариантной относительно интервалов по высоте и времени.

Поскольку изложенная методологическая сторона расчёта составляющих уравнения (1) Р, Е, W_{gl} вполне обоснованна, а допуски измерений температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара в воздухе на метеостанциях соответствуют стандартам, принятым в Росгидромете, окончательная оценка качества определения P, E, W_{gl} будет зависеть от пространственной репрезентативности полученных эмпирических зависимостей: $T_s = T_s(Z), T_v = T_v(Z), P_s = P_s(Z),$ $P_{v} = P_{v}(Z), e_{s} = e_{s}(Z), e_{v} = e_{v}(Z),$ где y – годовой интервал времени, a s - сезонный интервал времени, который различен на Северном Кавказе и в бассейне р. Катунь. На оценку качества расчёта составляющих правой части уравнения (1) влияют также известные погрешности измерения расходов воды на гидропостах и последующего определения объёма стока, а также русловая фильтрация, бытовой, промышленный и сельскохозяйственный водозаборы. Такие сведения содержатся в пояснениях к Гидрологическим ежегодникам. В частности, для бассейнов рек Малка, Баксан, Чегем, Черек в 1998–2007 гг. по указанной выше причине установлено [23] уменьшение измеренного годового стока от 14 до 28%. Следует учитывать также, что суммарная предельная ошибка определения среднего годового расхода горных рек (по средним месячным данным) составляет 5–16% [28].

Весьма существенное, а порой критическое влияние на качество моделирования ледникового стока оказывают источники высотно-плошадной информации о ледниках [1-3, 29-31], когда в них: а) отсутствует единая система идентификации ледников, что препятствует сравнению изменений оледенения по каждому объекту; б) нет сведений о моренном покрове [например, 3, 29, 30]; в) вместо привязки совокупностей ледников к границам крупных речных бассейнов, что необходимо для применения метода водного баланса в расчётах стока, использован неудобный и необоснованный набор 19 политико-географических регионов на весь земной шар [например, 3, 29, 30]; отметим, что в современной версии Каталога ледников Китая [32] сохранено распределение ледников по 1450 речным бассейнам; г) несовместимы системы определения ориентации ледников [например, 29-31]. В Каталоге [31] почти в половине случаев отсутствует временная привязка данных и нет информации о масштабе и дате публикации топографических карт, использованных для однократного определения высотно-площадных параметров ледников. В том же источнике [31] число ледников в интервале площади от 0 до 0,5 км², т.е. с заведомо низким качеством определения F_{gl} , составляет 60,4% общего числа – 132 890.

Как следует из [1-3], число ледников в интервале площади от 0 до 0,5 км² в шести бассейнах рек Северного Кавказа равно 276 (205) из 457 (371), а в бассейне Катуни – 456 (746) из 767 (964). В скобках даны сведения из Каталога [3]. Интервал площади 0–0,5 км² выбран с учётом предельной абсолютной ошибки 0,1 км² измерения площади в Каталогах [1, 2]. Следовательно, чем больше ледник, тем меньше относительная ошибка ΔF (%) определения его площади F_{gl} . Эту зависимость описывает формула

$$\Delta F = 10 F_{gl}^{-1}.$$
 (32)

При $F_{gl} = 0,5 \text{ км}^2$ величина $\Delta F = 20\%$, и такая значительная ошибка определения площади F_{gl} отражается на качестве расчёта составляющих правой части уравнения (1). Несмотря на преобладание ледников с площадью $\leq 0,5 \text{ км}^2$, их вклад в общую площадь совокупности ледников несоразмерен числу. Так, в шести бассейнах рек Северного Кавказа этот вклад, по данным [1–3], составил 10,9% (9,1%), а в бассейне р. Катунь – 7,3% (19,0%). В скобках даны сведения из Каталога [3]. В целом, средневзвешенная по площади ошибка определения F_{gl} в Каталоге [1] для шести бассейнов Северного Кавказа оказалась равной 7,7%.

Результаты расчёта многолетних изменений объёма ледникового стока в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая, помимо качества морфометрических параметров в Каталогах [1, 2], в немалой степени зависят от надёжности сведений о ледниках в Каталоге [3], которые обусловлены пространственным разрешением спутниковых снимков, а также размером регулярной сетки по долготе и широте в цифровых моделях рельефа; кроме того, они содержат ошибки как дешифрирования объектов, так и методов получения их высотно-площадных показателей. Способы статистического определения ошибок приведены далее.

Характеристикой погрешности среднего значения \overline{X} служит относительная ошибка ε , которая рассчитывается по формулам

$$\varepsilon = (\Delta \overline{X}) / (\overline{X}) 100, \%; \tag{33}$$

$$\Delta \overline{X} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^{n} |\Delta X_i|},\tag{34}$$

где $|\Delta X_i|$ — абсолютная ошибка отдельного измерения.

Для оценки качества полученных результатов используется также средняя квадратичная ошибка $\sigma_{\bar{X}}$ среднего значения, которая определяется формулой

$$\sigma_{\overline{X}} = \sigma / \sqrt{n} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \overline{X}\right)^2 / n(n-1)},$$
(35)

где о характеризует отклонение единичного измерения от истинного значения

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}.$$
(36)

Кроме того, надёжность результатов измерений можно представить в виде выражения

$$X = \overline{X} \mp \tau \sigma_{\overline{X}},\tag{37}$$

где τ – параметр, используемый для табличного определения вероятности того, что *X* будет находиться в пределах $\overline{X} \mp \tau \sigma_{\overline{X}}$; в частности, при $\tau = 1$ истинная величина *X* с вероятностью 68% отличается от \overline{X} не более, чем на $\sigma_{\overline{X}}$.

В Технических записках к Каталогам [3, 31] отсутствуют данные о точности определения площадей и высотных параметров ледников, поэтому далее приведены результаты статистической обработки сведений из [4] и других источников либо процитированы соответствующие оценки качества определения площади.

Применение формул (33)—(37) подразумевает, что существует совокупность эталонных данных, одновременно с которой проведены измерения в репрезентативной контрольной выборке. Этому условию приближённо соответствует сравнение [4] площади 21 ледника в бассейне р. Катунь по материалам Каталога [2] и аэрофотосъёмки 1952 г. Средняя относительная ошибка є определения F_{gl} в данном случае составила 5,5%, а параметр $\sigma_{\bar{X}}$ оказался равным 0,82%. В работе [32] сообщается, что новая версия Каталога ледников Китая, подготовленная по спутнико-

	Азимуты								S/Moan
параметры	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	3	C3	Z/Ivieun
Ngl	100**/94	107/72	56/53	38/22	15/15	17/12	32/30	92/73	457/371
ΔN_{gl}	-6	-35	-3	-16	0	-5	-2	-19	-86
F _{gl}	165,3/158,4	147,6/105,7	58/52,2	95,9/44,4	20,7/44,8	17,2/6,3	15,1/16,9	73,4/59,7	593,2/488,4
ΔF_{gl}	-6,9	-41,9	-5,8	-34,2	6,8	-10,9	1,8	-13,7	-104,8
$T_{\rm V-IX}(Z_{ab})$	3,9/4,9	4,1/5,0	3,5/4,4	3,4/3,8	2,7/3,1	2,4/2,2	2,3/3,6	4,0/4,3	3,3/3,9
$\Delta T_{\rm V-IX}$	0,97	0,93	0,98	0,48	0,34	-0,22	1,35	0,37	0,65
$P_{\rm V-IX}(Z_{ab})$	612/607	609/604	618/615	626/628	637/642	643/657	643/631	610/616	624,8/625,0
W_{gl}	0,112/0,123	0,156/0,090	0,047/0,030	0,060/0,025	0,022/0,026	0,009/0,002	0,008/0,010	0,065/0,037	0,480/0,343
ΔW_{gl}	0,011	-0,066	-0,017	-0,036	0,004	-0,007	0,002	-0,028	-0,137
Ε	0,017/0,015	0,015/0,010	0,006/0,005	0,011/0,004	0,005/0,005	0,002/0,001	0,002/0,002	0,008/0,010	0,065/0,053
ΔE	-0,002	-0,005	-0,001	-0,007	0,001	-0,001	0,001	0,002	-0,012
E/W_{gl}	17,4/18,6	16,7/18,3	17,4/19,6	18,7/21,4	21,1/23,2	21,2/28	21,2/20,3	16,7/19,9	18,8/21,2
$\Delta E/W_{gl}$	1,2	1,6	2,2	2,7	2,1	6,8	-0,9	3,2	2,4

Таблица 4. Распределение по азимутам ледников параметров оледенения и составляющих водного баланса в шести речных бассейнах Северного Кавказа*

 $*N_{gl}$ – число ледников; F_{gl} – площадь ледника, км²; $T_{V-IX}(Z_{ab})$ – температура воздуха за май – сентябрь на средней высоте области абляции; $P_{V-IX}(Z_{ab})$ – слой осадков за май – сентябрь на средней высоте области абляции, мм; W_{gl} – объём таяния открытого льда и льда под мореной; E – объём испарения на площади области абляции за май – сентябрь (все объёмы даны в км³); E/W_{gl} – отношение объёмов испарения и таяния, %; Σ – сумма чисел; *Mean* – среднее, выделено жирным шрифтом. **В числителе результат определения параметра по данным работы [1], в знаменателе – по данным работы [3]. Добавление символа Δ указывает на разность между данными в числителе и знаменателе.

вым данным, содержат 42 370 (1723) ледников, свободных от морены, общей площадью 43 086,8 (1493,7) км². В скобках указаны число и площадь ледников с моренным покровам; среднее отношение $F_{mor}/F_{gl} = 12\%$. Средняя взвешенная ошиб-ка є определения F_{gl} в первом случае равна 3,2%, во втором – 17,6%. Примерно такая же величина є (3,8%) получена в Европейских Альпах [33] для ледников, свободных от морены, после сравнения определения F_{gl} на основе изображений со спутников LANDSAT TM и IKONOS. Каталог GAMDAM [29] для территории Высокой Азии в пределах 67,4-103,9° в.д. и 27,0-54,9° с.ш., подготовленный на основе изображений со спутника LANDSAT и цифровой модели SRTM, содержит 87 084 ледника площадью 91 263 км². Относительная ошибка определения площади в этом справочнике оказалась равной примерно 15%. Оценка качества определения площади ледников Бутана [34] по спутниковым изображениям выполнена четырьмя экспертами по выборке из 16 ледников (10 из них свободны от морены, остальные частично покрыты мореной). В результате использования нами данных из [34] для расчёта параметра є по формулам (33) и (34) средняя относительная ошибка определения площади для десяти ледников составила 10,1%, а для шести – 20,7%.

После обобщения ряда сведений по измерениям площади ледников в работе [35] предложена формула

$$e(S) = 0,039 \, k \, S^{0,70},\tag{38}$$

где e(S) — ошибка (км²) при определении площади, равной *S*, км², *k* — эмпирический параметр.

Формула (38) учитывает: неточность идентификации моренного покрова, игнорирование нунатаков, увеличение площади ледника за счёт включения снежного покрова, погрешности картографирования. По мнению авторов [35], наиболее правдоподобное значение параметра k равно 3. Сравнение расчётов по формулам (32) и (38) показало, что в диапазоне 0,1-0,5 км² ошибка определения площади по формуле (38) меньше, чем по (32). По мере увеличения площади расчёт ΔF по уравнению (38) даёт систематически завышенные результаты по сравнению с формулой (32). По этой причине среднее взвешенное ΔF ледников в шести бассейнах Северного Кавказа оказалась равной 8,6% вместо 7,7% по уравнению (32). Перечисленные здесь сведения о ΔF в различных регионах подтверждают высказанное в работе [35] мнение о том, что надёжное определение площади ледников всё ещё нуждается в технологическом и методическом совершенство-

	Речные бассейны (гидропосты)						
Параметры	Баксан	Малка (Камен-	Теберда	Терек, верховье	Чегем	Черек	$\Sigma/Mean$
	(Заюково)	номостский)	(Теберда)	(Владикавказ)	(Нижний Чегем)	(Советский).	
F _{mor}	8,0/8,9**	1,0/1,1	2,5/2,6	7,2/5,9	3,4/3,5	21,7/25,4	43,8/47,4
$N_{gl}(F_{mor})$	26/31	2/2	17/16	27/18	15/21	43/35	130/123
$H_c(Z_e)$	11/27	3/5	15/43	27/24	11/34	16/39	83/172
F _{ab}	76,4/69,4	28,6/26,1	28,1/23,7	33,0/23,0	29,4/24,5	98,4/75,5	293,9/242,1
$T_{\rm V-IX}(Z_{ab})$	4,12/4,72	2,63/2,37	7,05/7,06	3,69/3,62	4,97/5,13	5,07/5,92	4,6/4,8
$W_{gl}(1)$	0,103/0,099	0,022/0,028	0,083/0,067	0,036/0,015	0,057/0,033	0,166/0,103	0,468/0,344
$W_{gl}(2)$	0,150/0,141	0,041/0,045	0,099/0,080	0,056/0,029	0,074/0,047	0,224/0,142	0,644/0,484
$W_{gl}(3)$	0,170/0,156	0,048/0,050	0,105/0,085	0,065/0,034	0,080/0,051	0,248/0,184	0,716/0,560
Ε	0,016/0,016	0,007/0,006	0,006/0,005	0,007/0,006	0,007/0,006	0,058/0,014	0,100/0,052
$W_{gl}(1)/W_{bas}, \%$	12,1/11,5	7,9/8,1	11,9/10,0	4,4/1,9	16,0/7,9	16,7/9,2	11,5/8,1
$W_{gl}(3)/W_{bas}, \%$	19,9/18,1	16,8/14,6	14,9/12,7	7,9/4,2	22,6/12,5	25,0/16,4	17,9/13,1
$KL \ 1 = F_{ac}/F_{ab}$	1,02/1,02	1,00/1,00	1,05/1,04	1,02/1,00	1,02/1,02	1,01/1,02	1,02/1,02
$KL \ 2 = \overline{F_{ac}/F_{gl}}$	0,50/0,51	0,50/0,50	0,51/0,51	0,50/0,50	0,50/0,51	0,50/0,50	0,50/0,50

Таблица 5. Распределение по бассейнам Северного Кавказа параметров оледенения и составляющих водного баланса*

 $*F_{mor}$ – площадь морены, км²; $N_{gl}(F_{mor})$ – число ледников с моренным покровом; $H_c(Z_e)$ – толщина морены на конце ледника, см; F_{ab} – площадь области абляции, км²; $T_{V-IX}(Z_{ab})$ – средняя взвешенная температура воздуха за май–сентябрь на средней высоте области абляции; $W_{gl}(1)$ – объём таяния открытого льда и льда под мореной; $W_{gl}(2)$ – объём таяния льда и сезонного снега в области абляции; $W_{gl}(3)$ – объём таяния льда и сезонного снега на всей площади ледника; E – объём испарения на площади области абляции за май–сентябрь (все объёмы в км³); W_{bas} – объём стока за апрель–сентябрь; Σ – сумма чисел; *Mean* – среднее, выделено жирным шрифтом; *KL* 1, *KL* 2 – ледниковые коэффициенты. **В числителе данные за 1946–1975 гг., в знаменателе – за 1976–2005 гг. При расчёте параметров оледенения и ледникового стока для интервала времени 1976–2005 гг. использованы формулы (2)–(30).

вании. Практика каталогизации континентального высокогорного оледенения показывает, что это заключение можно распространить и на определение высотных параметров ледников.

Результаты и обсуждение

Сводные результаты определения для шести водосборов на Северном Кавказе климатических и гидрологических характеристик, морфометрических параметров оледенения и расчётов ледникового стока для интервалов времени 1946-1975 и 1976-2005 гг. приведены в табл. 4-7. Качество модели ледникового стока в целом оценено путём сравнения измеренного стока с суммой рассчитанных составляющих правой части уравнения (1). По результатам, приведённым в табл. 6, сделаны следующие основные выводы: а) для интервалов 1946-1975 и 1976-2005 гг. относительные разности ΔW суммарных значений W_{bas} и W_{calc} вполне удовлетворительные; б) высокие значения ΔW в отдельных бассейнах обусловлены как качеством измерений стока, так и исходными данными для расчётов *P*, *E*, W_{gl} ; в) уменьшение суммы W_{calc} в 1976—2005 гг., для которого сумма осадков принята равной величине *P* в 1946—1975 гг., скорее всего, связано с невозможностью учёта положительного временного тренда годовой суммы осадков (см. рис. 1, *г*).

Совместный анализ сведений в табл. 1, 3–6 и на рис. 1 служит основанием для следующих выводов о динамике оледенения, его гидрологическом режиме и влиянии на годовой и сезонный сток в речных бассейнах.

Общим свойством ледникового стока, за исключением бассейна р. Малка, оказалось сокращение объёмов $W_{gl}(1) - W_{gl}(3)$. Несмотря на повсеместное и порой двукратное уменьшение относительной доли ледникового питания в общем речном стоке за апрель—сентябрь, это почти не отразилось на водообеспеченности вегетационного периода в отдельных бассейнах и в целом на Северном Кавказе. Во всех рассматриваемых бассейнах существенно сократились общая площадь ледников и областей их абляции. Кроме того, отмечен прирост площади льда под моренным покровом и увеличение его толщи-

Речные бассейны	Ζ	W _{bas}	Р	Ε	W_{gl}	D	W _{calc}	ΔW
Баксан	2480	1,059**/1,104	1,830/1,830	0,696/0,749	0,103/0,099	0,072/0,079	1,309/1,258	23,6/13,9
Малка	1984	0,431/0,478	1,204/1,204	0,446/0,494	0,022/0,028	0,052/0,055	0,832/0,793	93,0/65,9
Теберда	1737	0,806/0,798	0,464/0,464	0,143/0,160	0,083/0,067	0,034/0,036	0,439/0,407	-45,5/-49,0
Терек, верховье	2553	1,054/1,019	1,402/1,402	0,508/0,545	0,036/0,015	0,088/0,078	1,017/0,949	-3,5/-6,8
Чегем	2182	0,426/0,489	0,641/0,641	0,225/0,246	0,057/0,033	0,025/0,032	0,499/0,459	17,0/-6,0
Черек	2763	1,207/1,416	1,270/1,270	0,496/0,526	0,166/0,103	0,079/0,116	1,019/0,963	-15,6/-32,0
Σ1946	6–1975	4,983	6,811	2,514	0,644	0,350	5,114	2,6
Σ1976	6-2005	5,305	6,811	2,721	0,483	0,396	4,830	-8,9

Таблица 6. Сравнение измеренного годового стока и рассчитанного по уравнению (1)*

*Z – средняя взвешенная высота, м над ур. моря; W_{bas} – измеренный годовой объём стока, км³; P – годовой объём осадков, км³; E – годовой объем испарения, км³; W_{gl} – объём таяния открытого льда и льда под мореной, км³; D – динамический запас воды в бассейне, км³; $W_{calc} = P - E + W_{gl} + D$; $\Delta W = (W_{bas} - W_{calc})/W_{bas}$, %. **В числителе – данные за 1946– 1975 гг., в знаменателе – за 1976–2005 гг.

ны. Сокращение общей площади ледников и областей их абляции, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению объёма ледникового стока, что и произошло, несмотря на повсеместное увеличение температуры воздуха за май—сентябрь на средней высоте областей абляции (см. табл. 4). Аналогичный вывод о влиянии осадков оказался невозможен из-за вынужденного использования зависимостей (17) и (18) с коэффициентами, постоянными в течение 1946—2005 гг.

Как следует из табл. 4, уменьшение объёма ледникового стока в целом для шести бассейнов обусловлено суммарным эффектом роста температуры воздуха за май—сентябрь и сокращения площади оледенения. В явном виде эта зависимость не установлена, поскольку сокращение F_{gl} зависит от баланса аккумуляции и абляции. В предложенной модели ледникового стока выполняется расчёт выпадения и таяния на ледниках средних годовых и сезонных величин твёрдых атмосферных осадков для интервалов 1946—1975 и 1976—2005 гг. Однако данные измерений баланса массы для сравнения с результатами расчёта отсутствуют.

Средняя скорость сокращения площади ледников в бассейне р. Катунь за 1946– 2005 гг. по данным Каталогов [2, 3] составила 3,55 км²/год. Принимая во внимание несовпадение временно́го интервала и различия в исходных материалах, средняя скорость сокращения ледников 2,70 км²/год на Северном и Южном Чуйском хребтах за 1952–2004 гг. оказалась [4] более или менее близкой. Кроме того, в Каталоге [2] учтены все ледники площадью ≥ 0,1 км², а в [3] – ещё и 41 ледник с площадью < 0,1 км².

Одним из способов оценки гидрологического режима совокупности ледников служит расчёт объёма стока V_{gl} с площади оледенения независимо от водного баланса речного бассейна. Решение данной задачи получаем с помощью формулы (31), если положить, что f(c) – это суммарное таяние за период абляции на средней взвешенной высоте ледника, а определённый интеграл функции g(x) соответствует площади, на которой вычисляется объём стока. Тогда V_{gl} представляет собой сумму объёмов таяния льда W_{gl} , зимнего и летнего снега, а объём таяния под мореной в объёме W_{gl} не учитывается. В этом варианте расчёта следует принимать во внимание, что часть объёма таяния снега в области аккумуляции представляет собой источник инфильтрационного льдообразования и не попадает в объём V_{gl} . Для расчёта V_{gl} в случае равенства площадей абляции F_{ab} и аккумуляции F_{ac} в работе [12] получена формула

$$V_{gl} = W_{gl}(F_{gl}) - (W_{gl}(F_{ab}))/3,5,$$
(39)

согласно которой объём инфильтрационного льдообразования W_{inf} в области аккумуляции составляет примерно 29% объёма таяния в области абляции. Возможность применения формулы (39) для оледенения Северного Кавказа подтверждается равенством площадей абляции и аккумуляции, как это следует из табл. 5. В работе [12] для четырёх речных бассейнов выполнено определение W_{inf} в минимальный, максимальный и средний по водности годы, когда соотношение F_{ab} и F_{ac} отличается от их равенства. Оказалось, что, несмотря на различие объёмов W_{gl} , относительная доля стока из области аккумуляции достаточно устойчива.

Таблица 7. Сводные характеристики гидрологического режима ледников*

F _{ab}	F_{gl}	Z_{aver}	$T(Z_{aver})$	W_{gl}	V_{gl}			
Северный Кавказ, шесть бассейнов								
$\frac{293,9^{**}}{242,1}$	$\frac{593,2}{488,3}$	$\frac{3572}{3535}$	$\frac{2,6}{2,8}$	$\frac{0,467}{0,343}$	$\frac{0,670}{0,539}$			
Алтай, бассейн р. Катунь								
$\frac{366,9}{256,0}$	$\frac{737,8}{524,8}$	$\frac{3117}{3122}$	$\frac{3,2}{3,6}$	$\frac{0,386}{0,354}$	$\frac{0,597}{0,517}$			

* F_{ab} — площадь области абляции, км²; F_{gl} — общая площадь ледников, км²; Z_{aver} — средняя взвешенная высота совокупности ледников, м над ур. моря; $T(Z_{aver})$ — средняя температура воздуха (для мая—сентября на Северном Кавказе и июня—августа для Алтая) на высоте Z_{aver} , °С; W_{gl} — объём таяния открытого льда и льда под мореной (ледниковый сток), км³; V_{gl} — общий сток с ледника, км³. **В числителе — данные за 1946—1975 гг.; в знаменателе — за 1976—2005 гг.

Результаты регионального расчёта объёма стока с площади оледенения в речных бассейнах Северного Кавказа и Алтая (р. Катунь) в отдельные периоды 1946-2005 гг. представлены в табл. 7. Определение аналогичной по трактовке величины ледникового стока W_{gl} в бассейнах рек Кавказа рассмотрено в работе [36]. Сравнение наших данных *W_{gl}* и результатов работы [36] для 1946–1975 гг. *W*_{ol} приведено в табл. 8. Представленное в табл. 8 сравнение не совсем корректно, поскольку в методе определения W_{gl} [36] не учтено таяние льда под мореной, а для расчёта слоя таяния, в отличие от нашей модели ледникового стока W_{gl}, использована сумма положительных температур воздуха и коэффициент стаивания 7,2 мм/°С. В работе [36] приведены также годовые величины осадков и испарения в речных бассейнах. Однако они ещё менее пригодны для сравнения, поскольку оказалось [36], что рассчитанные зональные осадки P_{calc} существенно отличаются от измеренных, а испарение найдено как разность P_{calc} и стока, заданного как функция высоты местности [36].

Выводы

1. Разработан достаточно обоснованный и проверенный метод расчёта составляющих уравнения годового водного баланса (осадки, испарение, объём стока с площади оледенения, динамические запасы воды) для оценки многолетней динамики водных ресурсов в масштабе бассейнов снегово-ледникового типа питания рек Ев-

Таблица 8. Сравнение относительного вклада W_{gl} в питание рек на Северном Кавказе

	$W_{gl}, \%$	$W_{gl}, \%$
Ренные Бассейны (гилропосты)	(данные из	(результаты
Гечные бассейны (Гидропосты)	работы	настоящей
	[36])	работы)
Баксан (Заюково)	11,5	12,1
Малка (Каменномостский)	7,2	7,1
Теберда (Теберда)	30,5	11,9
Терек, верховье (Владикавказ)	7,2	4,4
Чегем (Нижний Чегем)	14,5	16,0
Черек (Советский)	21,5	16,7

разии и других континентов с аналогичными природными условиями.

2. Получен комплекс региональных расчётных формул для определения осадков, температуры и упругости водяного пара в воздухе, интенсивности таяния льда под мореной, открытого льда и испарения в бассейнах рек Северного Кавказа и р. Катунь (Алтай).

3. Установлено, что, несмотря на повсеместное, а порой и двукратное уменьшение относительной доли ледникового питания в общем речном стоке за апрель—сентябрь это почти не отразилось на водообеспеченности вегетационного периода в отдельных бассейнах и в целом на Северном Кавказе. В бассейнах рек Северного Кавказа и р. Катунь произошло существенное сокращение общей площади ледников и областей их абляции, а также прирост площади льда под моренным покровом и увеличение его толщины. Оба события привели к уменьшению объёма ледникового стока, хотя температура воздуха за май—сентябрь на средней высоте областей абляции выросла.

4. Моделирование и результаты расчёта среднего многолетнего ледникового стока с использованием зависимостей климатических факторов и типов поверхности ледника только от высоты местности пока можно считать приближёнными, поскольку игнорируется двухмерное пространственное распределение температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара в воздухе, характеристик морены и открытого льда. Тем не менее, даже такой вариант моделирования ледникового стока и его климатических факторов показал, учитывая качество исходной информации, вполне приемлемый результат при сравнении вычисленного и измеренного стока на замыкающих гидростворах в шести бассейнах рек Северного Кавказа.

5. Обоснованием вывода о качестве расчёта параметров гидрологического режима рек снегово-ледникового типа питания служит сравнение измеренного стока и рассчитанного как сумма составляющих правой части уравнения (1). Слабое звено в этой сумме — результаты расчёта годовых и сезонных осадков, имеющих наибольшее влияние на речной сток. Хотя модельные сведения о ледниковом стоке с площади ледников $\leq 0,5$ км² содержат существенную погрешность из-за низкой точности определения F_{gl} , вклад малых ледников в общую площадь совокупности несравненно меньше их числа (см. раздел «Качество моделирования ледникового стока»).

6. Теоретически обоснованный метод расчёта объёма стока с площади оледенения по формуле (39) может быть использован для оценки в

Литература

- 1. Каталог ледников СССР: Т. 8. Ч. 3, 5–7, 11. Л.: Гидрометеоиздат, 1967–1977.
- 2. Каталог ледников СССР: Т. 15. Вып. 1. Ч. 4–7. Л.: Гидрометеоиздат, 1978.
- Randolph Glacier Inventory A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. July 2015. http://glims. org/RGI/index.html
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
- 5. *Никитин С.А.* Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 87–96.
- 6. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе на метеостанциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. http://meteo.ru/data
- 7. Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ). Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 184 с.
- 8. Ледник Марух (Западный Кавказ). Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 254 с.
- Материалы наблюдений на горно-ледниковых бассейнах МГД в Советском Союзе: Вып. 1. 1965– 1969 / Ред.: Н.А. Бочин и А.Н. Кренке. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 236 с. Вып. 2. 1969–1974. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 301 с.

региональном масштабе многолетней динамики водных ресурсов в бассейнах снегово-ледникового типа питания рек Евразии и других континентов. Для этого достаточно высотно-площадных параметров F_{gl} , Z_{med} в Каталогах ледников [3, 30–32], приведённых к границам крупных водосборов, методов экстраполяции по высоте характерных средних значений температуры воздуха, а также локальных/региональных формул интенсивности таяния снега и льда типа выражений (4) и (5).

7. Качество оценки последствий положительного тренда сокращения площади континентального оледенения России и других стран на состояние водных ресурсов в речных бассейнах, при прочих равных условиях, обусловлено содержанием и временным разрешением существующей гляциологической информации в региональном и локальном масштабах (Каталог ледников СССР, Справочники RGI 5-6, GAMDAM).

References

- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 8. Parts 3, 5–7, 11. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967– 1977. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 15. Issue 1. Parts 4–7. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. [In Russian].
- Randolph Glacier Inventory A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. July 2015. http://glims. org/RGI/index.html
- Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. Sovremennye izmeneniya lednikov gornykh rayonov Rossii. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: Association of scientific publications KMK, 2015: 288 p. [In Russian].
- Nikitin S.A. Regularities of distribution of glacial ice in the Russian Altai, estimation of their storage and dynamics. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2009, 107: 87–96. [In Russian].
- 6. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov, temperatury vozdukha i uprugosti vodyanogo para v vozdukhe na meteostantsiyakh Rossii. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2015620394. Description of the dataset the monthly precipitation totals, air temperature and vapor pressure in the air at the meteorological stations of Russia. The certificate of state registration database No. 2015620394. http://meteo.ru/data. [In Russian].
- 7. *Lednik Djankuat (Tsentralnyi Kavkaz)*. The Djankuat Glacier (Central Caucasus). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978: 184 p. [In Russian].

- Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 118 с.
- 11. Ревякин В.С., Галахов В.П., Голещихин В.П. Горноледниковые бассейны Алтая. Томск: изд. Томского университета, 1979. 309 с.
- 12. *Коновалов В.Г.* Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 237 с.
- Konovalov V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff // IAHS Publ. № 264. 2000. P. 109–118.
- Konovalov V.G. New approach to estimate water output from regional populations of mountain glaciers in Asia // Geography. Environment. Sustainability. 2015. V. 8. № 2. P. 13–29.
- 15. Коновалов В.Г., Пиманкина Н.В. Пространственновременное изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 453–471. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4-453-471.
- Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas // Journ. of Hydrology. 2003. V. 282. P. 104–115.
- Душкин М.А., Олейник И.Я. Абляция ледников Актру и ее зависимость от положительных температур воздуха // Гляциология Алтая. 1967. Вып. 5. С. 22–41.
- Паромов В.В. Ресурсы речного стока бассейна верхней Оби (современная оценка и тенденции изменения). Томск: изд. ТГУ, 2002. 113 с.
- Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods // Hydrological Processes. 1998. V. 12. P. 429–442.
- 20. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for Russia. http://www.R-ArcticNET.sr.unh.edu
- 21. *Bodo B.A.* Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July, 2000.
- 22. Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis // Environment Research Letter. 2009. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045015.
- Государственный водный кадастр, 1997–2007. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Т. 1. Вып. 26. Ростов-на-Дону, 2000–2009. 214 с.
- 24. Global Glacier Change Bulletin. № 1 / Eds.: M. Zemp, I. Gärtner-Roer, S.U. Nussbaumer, F. Hüsler, H. Machguth, N. Mölg, F. Paul, and M. Hoelzle. World Glacier Monitoring Service. Zürich, Switzerland, 2015. 230 p. doi: 10.5904/wgmsfog-2015-11.
- 25. *Щетинников А.С.* Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1988. 219 с.
- 26. Поповнин В.В., Резепкин А.А., Тиелидзе Л.Г. Разрастание поверхностной морены на языке ледника

- Lednik Maruh (Zapadnyi Kavkaz). The Marukh Glacier (Western Caucasus). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988: 254 p. [In Russian].
- Materialy nablyudeniy na gorno-lednikovykh basseynakh MGD v Sovetskom Soyuze. Materials of observations in mountain-glacial basins of IHD in the Soviet Union. Issue 1. 1965–1969. Eds.: N.A. Bochin, A.N. Krenke. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 236 p. Issue 2. 1969–1974. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 301 p. [In Russian].
- 10. *Ledniki Aktru (Altay)*. Aktru Glaciers (Altay). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 118 p. [In Russian].
- Revyakin V.S., Galakhov V.P., Goleshchikhin V.P. Gornolednikovye basseyny Altaya. Mountain-glacial basins of Altai. Tomsk: Tomsk University Publishing, 1979: 309 p. [In Russian].
- 12. Konovalov V.G. Tayanie i stok s lednikov v basseynakh rek Sredney Azii. Melting and glacier runoff in Central Asia river basins. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 237 p. [In Russian].
- 13. *Konovalov V.G.* Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff. IAHS Publ. 2000, 264: 109–118.
- Konovalov V.G. New approach to estimate water output from regional populations of mountain glaciers in Asia. Geography. Environment. Sustainability. 2015, 8 (2): 13–29.
- Konovalov V.G., Pimankina N.V. Spatial-temporal variability of water balance components in the northern slope of Ile Alatau. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2016, 56 (4): 453–471. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4-453-471. [In Russian].
- 16. *Hock R*. Temperature index melt modelling in mountain areas. Journ. of Hydrology. 2003, 282:104–115.
- 17. Dushkin M.A., Oleynik I. Ya. Ablation of Aktru glaciers and its dependence on the positive air temperature. *Glyatsiologiya Altaya*. Glaciology of the Altai region. 1967, 5: 22–41. [In Russian].
- Paromov V.V. Resursy rechnogo stoka basseyna verkhney Obi (sovremennaya otsenka i tendentsii izmeneniya). Resources of river runoff of the upper Ob basin (modern estimation and trends). Tomsk:Tomsk University Publishing, 2002: 113 p. [In Russian].
- 19. Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. Hydrological Processes, 1998, 12: 429–442.
- 20. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network for Russia. http://www.R-ArcticNET.sr.unh.edu
- 21. *Bodo B.A.* Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July, 2000.
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis. Environ. Research Letter, 2009. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045015.
- 23. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr, 1997–2007. Eghegodnye dannye o regime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. The state water cadastre, 1997–2007. Annual data on the regime and resources of surface land waters. Part. 1. V. 1. Issue 26. Rostov-on-Don, 2000–2009: 214 p. [In Russian].
- 24. Global Glacier Change Bulletin. No. 1. Eds.: M. Zemp, I. Gärtner-Roer, S.U. Nussbaumer, F. Hüsler, H. Machguth, N. Mölg, F. Paul, M. Hoelzle. World Glacier Monitoring Service, Zürich, Switzerland. 2015: 230 p. doi: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

Джанкуат за период прямого гляциологического мониторинга // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 89–98.

- Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., Kääb A. Regionwide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011 // The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 1263–1286. doi: 10.5194/tc-7-1263-2013.
- 28. *Карасев И.Ф., Чижов А.Н.* О точности определения стока по гидрометрическим данным // Метеорология и гидрология. 1969. № 2. С. 78–84.
- 29. Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers // The Cryosphere. 2015. № 9. P. 849–864. doi: 10.5194/tc-9-849-2015.
- RGI Consortium, 2017, Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. Digital Media. doi: https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60.
- WGMS and NSIDC, 1999. Updated 2012. World Glacier Inventory. Compiled and made available by the World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, U.S.A. doi: 10.7265/N5/NSIDC-WGI-2012-02.
- 32. Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, Wu Lizong, Shangguan Donghui, Yao Xiaojun, Wei Junfeng, Bao Weijia, Yu Pengchun, Liu Qiao, Jiang Zongli. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results // Journ. of Glaciology. 2015. V. 61. № 226. P. 357–372. doi: 10.3189/2015JoG14J209.
- 33. Paul F., Frey H., Le Bris R. A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results // Annals of Glaciology. 2011. V. 52 (59). P. 144–152. doi: 10.3189/172756411799096295/.
- 34. Nagai H., Fujita K., Sakai A., Nuimura T., Tadono T. Comparison of multiple glacier inventories with a new inventory derived from high-resolution ALOS imagery in the Bhutan Himalaya // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 65–85. doi: 10.5194/tc-10-65-2016.
- 35. Pfeffer W.Tad, Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A.S., Hagen J-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C., Miles E.S., Moholdt G., Molg N., Paul F., Radic V., Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp M.J. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // Journ. of Glaciology. 2014. V. 60. № 221. P. 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
- 36. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2002. 502 с.

- 25. Shchetinnikov A.S. Morfologiya i reghim lednikov Pamiro-Alaya. Morphology and regime of glaciers in the Pamir-Alay. Tashkent: SANIGMI Publishing, 1988: 219 p. [In Russian].
- Popovnin V.V., Rezepkin A.A., Tielidze L.G. The expansion of the surface moraine on the glacier tongue Djankuat for the period direct glaciological monitoring. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2015, 19 (1): 89–98. [In Russian].
- 27. *Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., and A. Kääb.* Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011. The Cryosphere. 2013, 7: 1263–1286. doi: 10.5194/tc-7-1263-2013.
- Karasev I.F., Chighov A.N. On the accuracy of flow measurement by hygrometry data. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1969, 2: 78– 84. [In Russian].
- Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. The Cryosphere. 2015, 9: 849–864. doi: 10.5194/tc-9-849-2015.
- RGI Consortium, 2017, Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. Digital Media. doi: https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60.
- WGMS and NSIDC, 1999. Updated 2012. World Glacier Inventory. Compiled and made available by the World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, U.S.A. doi: 10.7265/N5/NSIDC-WGI-2012-02.
- Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, Wu Lizong, Shangguan Donghui, Yao Xiaojun, Wei Junfeng, Bao Weijia, Yu Pengchun, Liu Qiao, Jiang Zongli. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results. Journ. of Glaciology. 2015, 61 (226): 357–372. doi: 10.3189/2015JoG14J209.
- Paul F., Frey H., Le Bris R. A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results. Annals of Glaciology. 2011, 52 (59): 144–152. doi: 10.3189/172756411799096295.
- 34. Nagai H., Fujita K., Sakai A., Nuimura T., Tadono T. Comparison of multiple glacier inventories with a new inventory derived from high-resolution ALOS imagery in the Bhutan Himalaya. The Cryosphere. 2016, 10: 65–85. doi: 10.5194/tc-10-65-2016.
- 35. Pfeffer W.Tad, Arendt A.A., Bliss A., Bolch T., Cogley J.G., Gardner A.S., Hagen J-O., Hock R., Kaser G., Kienholz C., Miles E.S., Moholdt G., Molg N., Paul F., Radic V., Rastner P., Raup B.H., Rich J., Sharp M.J. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journ. of Glaciology. 2014, 60 (221): 537–552. doi: 10.3189/2014JoG13J176.
- Lurie P.M. Vodnye resursy i vodnyi balans Kavkaza. Water resources and water balance of Caucasus. Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat, 2002: 502 p. [In Russian].