



**ИГРАН**

# Вопросы расчета гидрологического режима горного оледенения

**Коновалов В.Г.**

*Инст ит ут географии РАН (ИГРАН), Москва  
vladgeo@gmail.com*



XVIII Всероссийская  
открытая конференция  
«Современные проблемы  
дистанционного  
зондирования Земли  
из космоса»,  
17-20.11.2020

**Абстракт.** Для рек снегово-ледникового типа формирования стока разработана научно-информационная основа расчета составляющих уравнения годового водного баланса (сток, осадки, испарение, динамические запасы воды), которая включает: а) Метод определения средних и средневзвешенных параметров квазиоднородных групп ледников путем структурирования либо классификации исходной совокупности  $N_{gl}$  ледников выше замыкающего гидрологического створа. б) Рекомендации для расчета слоев осадков  $P$ , испарения и средних значений температуры воздуха  $T$  и упругости водяного пара  $U$  в воздухе как функции высоты местности и географических координат. в) Принятый для расчета талого стока состав типов поверхности ледников в период абляции: лед под мореной, открытый лед, фирн возрастом более одного года, зимний снег, летний снег. г) Результаты определения составляющих годового водного баланса для речных бассейнов Азии, Северного Кавказа и Аляски с площадью оледенения от 102 км<sup>2</sup> до 14 113 км<sup>2</sup>. Финансовая поддержка работы получена из бюджета Института географии РАН при выполнении научных тем № 0148-2018-0008 и № 0148-2019-0004.

# 1. Гидрологический режим горного оледенения

Для рек снегово-ледникового типа формирования стока связь между составляющими годового гидрологического цикла (сток, осадки, испарение) выражает уравнение водного баланса речного бассейна в виде:

$$R = K_R (P - E + W_{gl}) + \Delta W \quad \text{В км}^3 \quad (1)$$

где  $R$  – измеренный сток,  $P$  – сумма жидких осадков и разности аккумуляции  $Ac_{snow}$  и абляции  $Ab_{snow}$  сезонного снега,  $W_{gl}$  – таяние многолетних запасов льда и фирна возрастом более одного года,  $E$  – испарение с деятельной поверхности водосбора,  $\Delta W$  – динамические запасы воды в бассейне,  $K_R$  – коэффициент трансформации в сток объема воды, поступившей на поверхность бассейна. В работе принято, что региональная значимость определений гидрологического режима ледников обеспечивается: а) Возможностью пространственной экстраполяции локальных измерений баланса массы ледников; б) Использованием в гидрологических расчетах и прогнозах информации о генеральной совокупности ледников в речном бассейне; в) Использованием региональных формул для расчета пространственно-временных изменений сезонных и годовых величин абляции, баланса массы, температуры воздуха, осадков и испарения; г) Синтезированием генеральной совокупности ледников в речном бассейне на ряд характерных морфологических подмножеств.

## 1.1 Гидрологическая репрезентативность ледников.

Анализ и решение поставленной в разделе задачи основаны на оценке вклада летнего баланса массы  $B_s$  ледников в качестве потенциального аргумента уравнения множественной линейной регрессии для расчета стока рек за июнь-сентябрь. Этот интервал времени выбран как наиболее типичный при формировании большей части объёма ледникового питания рек. Для исследования использованы речные бассейны, расположенные на Северном Кавказе, Памиро-Алае и Алтае (см. Табл. 1). Модель речного стока  $W_{bas}$  принята в виде функции линейной регрессии осадков  $P$  и температуры воздуха  $T$ , т. е.  $W_{bas} = f(P, T)$ , где оба аргумента охватывают определенные характерные интервалы времени. Многолетние измерения баланса массы на ледниках Джанкуат, Абрамова и Малый Актру [2-5] были использованы при моделировании сезонного стока  $W_{bas}$  в речных бассейнах Северного Кавказа, Памиро-Алая и Алтая. Локальные измерения летнего баланса массы  $B_s$  на этих ледниках будем считать репрезентативными в масштабе речного бассейна, при условии, что  $B_s$  как дополнительная независимая переменная обеспечивает увеличение коэффициента множественной линейной корреляции для уравнения  $W_{bas} = f(P, T)$ .

После выполнения численных экспериментов с 28-летними выборками зависимых и независимых переменных установлены случаи, выделенные жирным шрифтом в табл. 1, когда эмпирические уравнения  $W_{bas} = f(P, T)$  для расчета речного стока в июне-сентябре включали данные о балансе массы  $B_s$  на одном из вышеназванных априори репрезентативных ледников. При задании независимых переменных  $P, T$ , измеренных на метеорологических станциях, использованы следующие интервалы времени:  $P=P(X-IV)$ ,  $T=T(VI-VIII)$ . В итоге установлено, что измерения годовой абляции/летнего баланса массы на ледниках Абрамова, Малый Актру и Джанкуат можно считать регионально репрезентативными только для некоторых водосборов (см. табл. 1) в бассейнах рек Памиро-Алая, Северного Кавказа и р. Катунь (Алтай).

Гидрологическая репрезентативность ледника является новой характеристикой, имеющей практическое значение для решения задач гидрологии и гляциологии в масштабе речных бассейнов снегово-ледникового типа формирования стока. В работе показано, что этот метод приемлем для ледников из существующей сети *WGMS* (Служба Глобального Мониторинга Ледников).

## 1.2 Региональное моделирование и расчет ледникового стока

Формирование ледникового стока на площади региональных гидрографических областей и горных систем происходит в дискретном множестве  $N_{gl}$  ледников, расположенном в значительном интервале по высоте и пространственным координатам. Например, в верховье р. Амударьи (бассейны рек Вахш и Пяндж) оледенение ( $N_{gl} = 5982$ ) расположено в интервалах: высоты  $z$  от 2100 м до 7300 м над уровнем моря, широты  $\phi = 36,0^\circ-40,2^\circ$  с.ш., долготы  $\lambda = 69,4^\circ-75,2^\circ$  в.д. Аналогичные характеристики оледенения на Северном Кавказе ( $N_{gl} = 1071$ ) равны:  $z = 1710-5660$  м над уровнем моря,  $\phi = 41,2^\circ-41,9^\circ$  с.ш. и  $\lambda = 40,2^\circ-48,0^\circ$  в.д. Для удобства составления прогнозов стока в крупных региональных областях следует выделять субрегионы – как правило это притоки главного водотока 2-3 порядков, имеющие гидрологический створ в устье реки. Учитывая диапазоны и дискретность пространственного распространения ледников, общий подход к описанию пространственных изменений составляющих уравнения (1) отражает формула  $y=y(z, \phi, \lambda)$ , где  $y$  – символизирует одну из искомым целевых функций.

### 1.2.1 Расчет интенсивности и объема абляции

Методы определения абляции снега и льда в моделях процесса ледникового стока  $W_{gl}$  можно разделить на два класса: а) Применение уравнения теплового баланса (ТБ) деятельной поверхности ледника; б) Параметризация ТБ в виде уравнений регрессии.

Физически обоснованный вариант определения интенсивности абляции льда и старого фирна  $ab_{if}(m,t)$  следующий:

**Таблица 1 Вклады осадков, температуры воздуха, абляции или летнего баланса массы ( $Ab/B_s$ )  
в уравнения для расчёта стока за июнь–сентябрь.**

Река	Гидропост	$F_{bas}$	$F_{gl}$ [11]	$F_{gl}$ [12]	Три аргумента			Четыре аргумента	
					$R(Q_{vi-ix})_3$	$\eta P$	$\eta(T/B_s)$	$R(Q_{vi-ix})_4$	$\eta(T/B_s)$
<b>Бассейн р. Катунь (Алтай)</b>									
Катунь	Сростки	58 400	738,9	524,7	0,82	1,00	0,00	0,82	0,00/0,05
Катунь	АКТ	14 199	170,2	118,6	0,76	0,85	0,00/0,15	0,77	0,00/0,21
Чуя	Белый Бом	10 900	232,2	170,1	0,65	1,00	0,00	0,67	0,04/0,00
Актру	Актру	36,0	31,0	28,9	0,84	0,03	0,00/0,97	0,84	0,00/0,96
<b>Бассейны рек на Северном Кавказе</b>									
Терек	Владикавказ	1 490	66,6	46,0	0,72	1,00	0,00	0,76	0,00
Терек	Котляревская	8 920	685,6**	637,6	0,72	1,00	0,00	0,74	0,00
Малка	Прохладная	2 860	189,5**	174,3	0,68	1,00	0,00	0,69	0,00
Баксан	Заюково	2 100	154,2	140,2	0,71	0,85	0,15/0,00	0,75	0,48/0,00
Чегем	Нижний Чегем	739	59,3	49,5	0,84	0,51	0,49/0,00	0,88	0,45/0,00
Черек	Советский	1 350	198,1	152,2	0,72	0,15	0,85/0,00	0,73	0,86/0,00
Теберда	Теберда	504	57,6	48,2	0,70	0,27	0,73/0,00	0,73	0,00/0,00
Малка	Каменноостское	1 540	57,3	52,3	0,73	1,00	0,00	0,76	0,00/0,00
<b>Бассейны рек на северных склонах Алайского хребта</b>									
Исфара	Ташкуртан	1560	125,0	116,4	0,81	0,17	0,83/0,00	0,82	0,82/0,00
Сох	Сарыканда	2480	240,5	272,6	0,92	0,35	0,65/0,00	0,94	0,72/0,00
Шахимардан	Джидалик	1180	30,1	43,0	0,76	0,47	0,53/0,00	0,80	0,66/0,00
Исфайрам	Учкоргон	2200	66,5	68,6	0,74	0,71	0,29/0,00	0,80	0,76/0,00
Акбура	Папан	2200	63,5	63,0	0,82	0,35	0,17/0,49	0,83	0,22/0,49

**Обозначения.**  $F_{bas}$  – площадь бассейна до гидропоста;  $F_{gl}$  [11] – площадь ледников в Каталоге ледников СССР;  $F_{gl}$  [12] – площадь ледников в Каталогах [12] – все площади до замыкающего гидропоста, кроме общей площади оледенения в бассейне (отмечено символом\*\*), в км<sup>2</sup>;  $R(Q_{vi-ix})_3$  – сводный коэффициент корреляции уравнения регрессии  $Q_{vi-ix} = f(P, T)$  для трёх или четырёх  $R(Q_{vi-ix})_4$  аргументов;  $P$ ,  $T$  – соответственно сезонные суммы и средние значения осадков  $P$  и температуры воздуха  $T$  за характерные периоды;  $\eta P$  – детерминированный вклад  $P$  в описание дисперсии стока за июнь–сентябрь  $Q_{vi-ix}$ ;  $\eta T$  – то же для  $T$ . При использовании четырёх аргументов к  $P$  и  $T$  добавлена сезонная абляция  $Ab$  либо летний баланс массы  $B_s$  на ледниках Малый Актру (бассейн р. Катунь) или Джанкуат (бассейн р. Терек);  $\eta Ab/B_s$  – детерминированный вклад добавленного аргумента в описание дисперсии стока  $Q_{vi-ix}$ , АКТ – сумма стока рек Аккем, Кучерла и Катунь (гидропост Тюнгур).

$$ab_{if}(m, t) = f[\mu(t), m], \quad (3)$$

где  $\mu$  – тепловой баланс (ТБ) тающей поверхности ледника, включающий: балансы коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации, поток тепла к леднику из атмосферы и тепловой эквивалент влагообмена в приледниковом слое воздуха, теплоотдачу жидких осадков, выпавших на ледник, расход тепла на таяние льда и снега, и прогревание деятельного слоя. Для расчета  $\overline{ab}_{if}$  в формуле (3) на основе метода ТБ, помимо топографии  $m$ -го типа поверхности, требуется распределенная в пространстве информация об альбедо снега и льда, осадках, температуре воздуха, облачности, прозрачности атмосферы, упругости водяного пара в воздухе, скорости ветра, продолжительности освещения солнцем площади  $f_{gl}$ , толщине сплошного моренного покрова, при его наличии на леднике.

Для лучшего приближения к условиям формирования ледникового стока, были получены [6-8] варианты параметризации  $\mu$  как функции средних значений температуры воздуха  $T$  и поглощенной коротковолновой солнечной радиации  $R_{abs}$  на горизонтальной поверхности ледника, либо только  $T$  за декадный, месячный и сезонный интервалы времени. В первом случае  $\mu_1=f(R_{abs}, T)$ , а во втором  $\mu_2=f(T)$ . Параметризация теплового баланса вида  $\mu_1=f(R_{abs}, T)$ , и  $\mu_2=f(T)$  использована при моделировании ледникового стока  $W_{gl}(m, t)$  в бассейнах рек Центральной Азии и Кавказа. Сравнение ошибок определения абляции по эмпирической формуле  $ab=f(R_{abs}, T)$  и по уравнению ТБ показало значимое преимущество эмпирической формулы, вследствие уменьшения числа параметров и переменных, используемых для расчета.

### 1.2.2 Расчет осадков, испарения и температуры воздуха

В результате исследования линейной и нелинейной аппроксимации средних месячных значений  $T$ ,  $P$ ,  $U$  по данным 660 метеостанций на территории Центральной Азии в интервалах: высоты 0,60-4,2 км над уровнем моря и географических координат 35-45°с.ш. и 66-81°в.д. установлены коэффициенты корреляции более 0,80 линейных уравнений  $T=T(z)$ ,  $U=U(z)$  в течение февраля-ноября, которые значимо возрастают при аппроксимациях вида  $T=T(z, long, lat)$  и  $U=U(z, long, lat)$ . Коэффициенты корреляции уравнений для расчета осадков достигают значений более 0,70 в январе-декабре только для нелинейных уравнений  $P=P(z \div z^4, long, lat)$ . Одномерную региональную зависимость  $T=T(z)$  для бассейна р. Вахш (Памир) иллюстрирует рис.1. Несмотря на высокую тесноту связи, при использовании для расчета  $T_s$  формулы  $T=T(z, long, lat)$  коэффициент детерминации возрастает до 0,98 и средняя квадратичная ошибка определения  $T_s$  уменьшается до 0,57 °С.

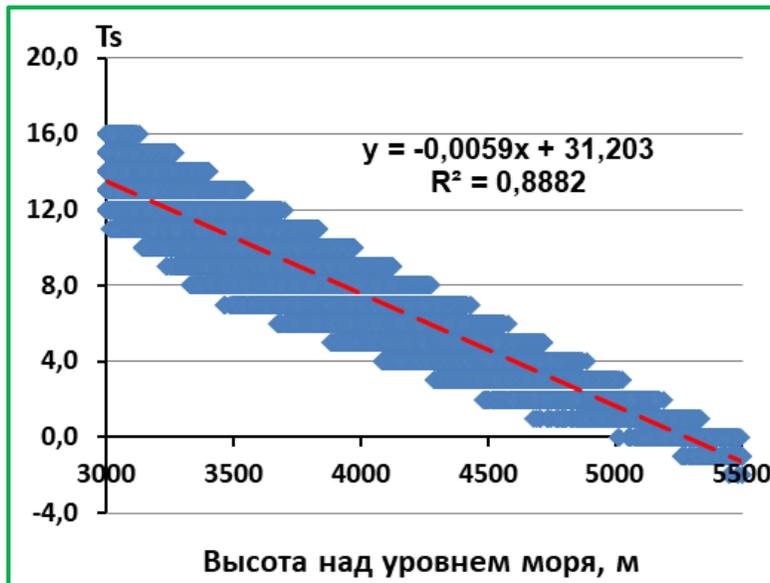


Рис.1 Средняя летняя температура воздуха в бассейне р. Вахш как функция высоты  $z$ . По данным из [17]. Формула на рисунке характеризует связь  $T_s = f(z)$ .  $R^2$  – коэффициент детерминации, средняя квадратичная ошибка расчета  $T_s = 1,28$  °С.

Для расчета ледникового стока в бассейнах притоков Вахша как функции высоты **Alt**, долготы **Long** и широты **Lat** рекомендована формула:

$$T_s = -34,654 - 0,0066 \cdot \text{Alt}(m) + 1.0951 \cdot \text{Long} - 0.2421 \cdot \text{Lat}$$

### 1.2.3. Структурирование и классификация совокупности ледников

Процесс структурирования параметров совокупности  $N_{gl}$  ледников состоит из двух основных этапов: 1. Экспертная идентификация приблизительно однородных групп ледников по площади и расположению в бассейне основной реки. 2. Расчет для выделенных групп средних значений  $F_{gl}$ ,  $F_{mor}$ , распределения  $F_{gl}(Z)$ , средних взвешенных высот  $Z_{beg}$ ,  $Z_{fb}$ ,  $Z_{hlm}$ ,  $Z_{end}$ , географических координат ( $Long$  – долгота,  $Lat$  – широта), толщины морены на конце ледника. Информационной основой для экспертного структурирования совокупностей пронумерованных ледников в речных бассейнах служат обзорные и частные гидрографические схемы в отдельных выпусках Каталога ледников СССР [11]. Помимо экспертной идентификации групп ледников рекомендуется статистически и генетически обоснованная компьютерная классификация  $N_{gl}$  на интервальный ряд подгрупп в зависимости от ориентации и площади индивидуальных ледников. В итоге, совокупность  $N_{gl}$  ледников в речном бассейне или в пределах заданной горной области оказывается классифицированной максимально на 184 квазиоднородные группы, если в каждом из восьми подмножеств по ориентациям  $N$ ,  $NE$ ,  $E$ ,  $SE$ ,  $S$ ,  $SW$ ,  $W$ ,  $NW$  заполнены все 23 заданных интервала по площади.

Пример результатов классификации и структурирования совокупности ледников в речном бассейне иллюстрируют рис.2 а-б. Если сравнивать рассмотренные методики синтезирования параметров индивидуальных ледников, то предпочтения заслуживает классификация – как более количественно обоснованная и пригодная для оценки изменения оледенения.

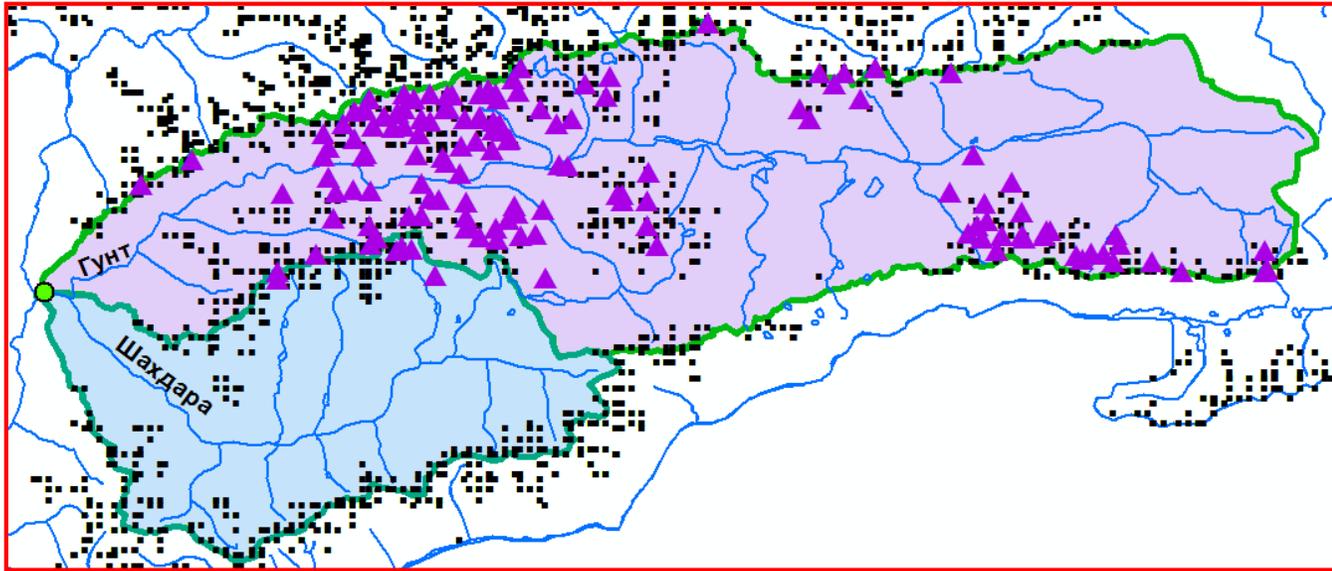


Рис. 2а. Классификация совокупности 639 ледников в бассейне Гунта на 142 группы.

■ - отдельные ледники,  
▲ - группы.

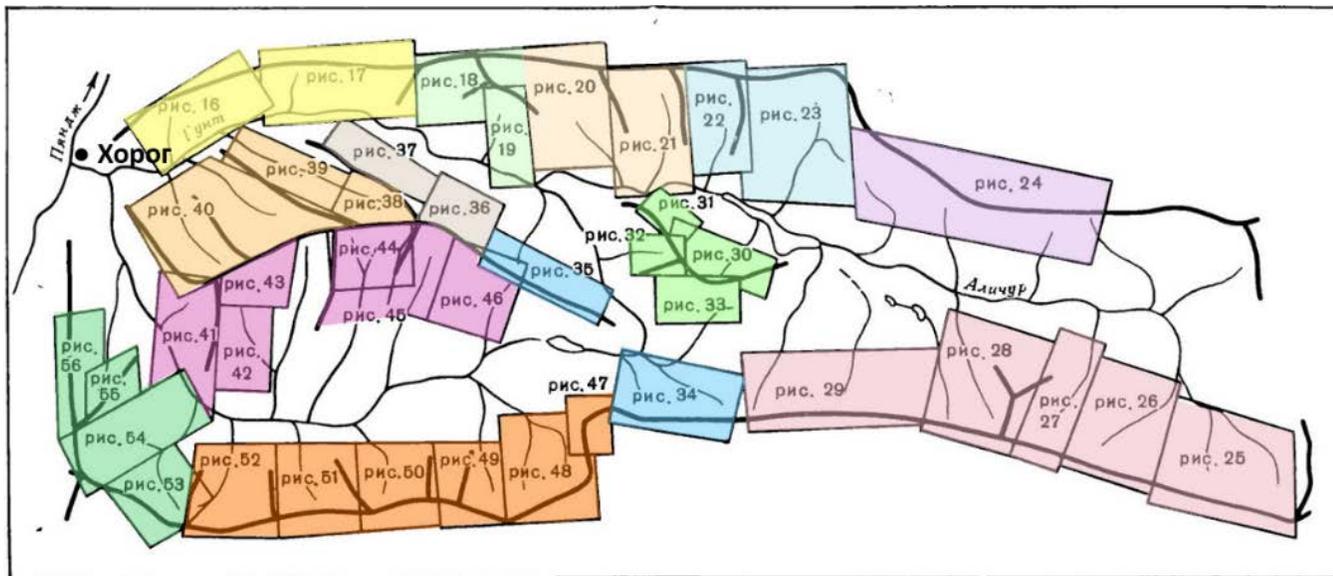


Рис. 2б. Структурирование ледников в бассейнах р. Гунт, Шахдара (Памир) на 13 групп (выделены различным цветом) для расчета ледникового стока по модели РЕГМОД [6-7]. Расположение ледников в группах иллюстрируют рисунки из Каталога [14]. Номера рисунков указаны на схеме.

**Таблица 2. Годовой водный баланс для бассейнов рек Азии и Северного Кавказа (среднее за 30 лет)**

Река	Гидропост (гп)	$\tilde{Z}_{bas}$	$N_{gr}$	$F_{bas}$	$F_{gl}$	$R_m$	$R_{I-III}$	$P$	$E$	$R_c$	$W_{gl}$	$dR$	$E/P$
				км <sup>2</sup>		км <sup>3</sup>						%	
Брахмапутра	Панду	3384	172*	405 000	14 113	619.6	40.0	719.0	162.0	635.4	37.6	2.6	22
Вахш	Комсомолабад	3600	2192*	29 500	3 824	18.85	1.37	26.30	11.1	19.81	3.21	5.1	42
Гунт	Хорог	4170	106*	13700	445	3.50	0.85	7.61	5.45	3.81	0.80	8.8	72
Зеравшан	Дупули	3100	13	10 200	674	4.84	0.30	11.1	4.73	4.95	0.34	2.3	43
Шахдара	Хабост	4160	67*	4 180	164	1.15	0.31	2.56	2.04	1.13	0.30	-1.8	80
Сох	Сарыканда	3480	5	2 480	252	1.38	0.08	2.00	1.11	1.51	0.33	9.4	56
Исфайрам	Учкоргон	3240	2	2 200	102	0.66	0.09	1.30	0.84	0.70	0.13	5.3	64
Акбура	Тулукен	3030	52*	2 430	114	0.63	0.06	1.53	1.13	0.73	0.19	3.2	41
Пскем	Муллола	2690	3	2 540	125	2.52	0.20	3.20	0.84	2.75	0.22	9.1	27
Язгулем	Мотравн	3920	99*	1 940	311	1.14	0.34	0.96	0.78	1.15	0.64	1.4	81
Или	10 гп		10	2 585	253	1.56	0.14	2.80	1.38	1.64	0.10	7.0	49
Терек	6 гп		6	7 723	488	5.30	0.40	6.80	2.51	4.97	0.48	-6.4	37

**Обозначения.**  $\tilde{Z}_{bas}$  – средняя взвешенная высота водосбора выше гп, м;  $N_{gr}$  – число классифицированных\* либо структурированных групп;  $F_{bas}$  – площадь бассейна выше гп;  $F_{gl}$  – площадь оледенения в бассейне;  $R_m$  – сток, измеренный на гп;  $R_{I-III}$  – объем стока в январе-марте;  $P$  – годовая сумма осадков в бассейне;  $E$  – годовой объем испарения;  $W_{gl}$  – ледниковый сток,  $R_c$  – сток, как сумма правой части (1);  $dR$  – разность между  $R_m$  и  $R_c$ ,  $\eta = R_m / P$  – коэффициент стока.

**Заключение.** Выполнены оценки региональной репрезентативности локальных измерений абляции/баланса массы на ледниках Актру, Джанкуат и Абрамова в уравнениях для расчёта стока рек Катунь (Алтай), на Северном Кавказе (8 бассейнов), Алайском хребте (5 бассейнов) за июнь–сентябрь. 2. Получен и проверен на независимых данных комплекс уравнений для расчета составляющих уравнения годового водного баланса. 3. Выполнены структурирование и классификация ледников в 26 речных бассейнах Евразии. 4. Для 26 речных бассейнов Евразии с площадью оледенения от 102 км<sup>2</sup> до 14 113 км<sup>2</sup> рассчитаны средние за 30-летний интервал времени объемы общего и ледникового стока, динамических запасов воды, осадков и испарения. Отклонение измеренного годового стока от рассчитанного по уравнению водного баланса составило от -1.8 % до 9.4 %.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 363 с.
2. Global Glacier Change Bulletin. № 1 / Eds.: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., and Hoelzle. World Glacier Monitoring Service. - Zürich, Switzerland, 2015. - 230 p. doi: 10.5904/wgmsfog-2015-11.
3. Камнянский Г.М. Итоги наблюдений за балансом массы ледника Абрамова (1967–1998 годы) // Тр. САНИГМИ. - 2001. - № 161 (242). - С. 122–131.
4. Ледник Абрамова. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 206 с.
5. Ледники Актру. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 117 с.
6. Коновалов В.Г. Расчет и прогноз таяния ледников Средней Азии. - Л: Гидрометеиздат, 1979. - 231 с.
7. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. - Л: Гидрометеиздат, 1985. - 237 с.
8. Hock R. DEBAM and DETIM// Manual, 1999. <https://github.com/regine/meltmodel.git>
9. Konovalov V.G. Snow line and formation of glacier-derived runoff in glacial basins. In: 34 selected papers on main ideas of the soviet glaciology, 1940s-1980s //Initiated, compiled and edited by V.M.Kotlyakov. - Moscow, 1997. - p. 402-410.
10. Xu C.-Y. and Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods // Hydrological Processes. - 1998. - 12. p. 429-442.
11. Каталог ледников СССР. - М., Л.: Гидрометеиздат, 1965. -1982.
12. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0// Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. - Colorado, USA. - 2017. - Digital Media. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
13. Коновалов В.Г. Изменения и репрезентативность параметров горного оледенения // Лед и Снег. - 2020. - 60 (2). - С.165–181.
14. Каталог ледников СССР. Том 14, вып. 3, часть 15. Бассейн р. Гунт. - Л: Гидрометеиздат, 1979. - 121 с.
15. Zemp M., Hoelzle M. and Haeberli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network // Annals of Glaciology. - 2009. - 50. - pp. 101-111.
16. Коновалов В.Г., Пиманкина Н.В. Пространственно-временное изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау // Лед и Снег. -2016. - Т. 56. - № 4. - с. 453-371.
17. Hijmans R., Cameron S., Parra J., Jones P., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2005. – 25. – P. 1965-1978