

Многолетние изменения составляющих водного баланса в бассейнах рек снегово-ледникового питания

В. Г. Коновалов*

Для области формирования стока р. Зеравшан выше гидропоста Дупули впервые определена изменчивость за 1935—1990 гг. основных составляющих годового водного баланса: осадков, испарения, ледникового питания и динамического запаса воды в бассейне. Многолетние данные о годовом стоке р. Зеравшан с площади 10 200 км² получены по данным измерений на посту Дупули, остальные составляющие водного баланса определены расчетными методами. Сравнение измеренного и рассчитанного объемов годового стока показало, что относительная разность между ними имеет систематический характер и в целом за расчетный период находится в интервале от –0,31 до –4,78%. В бассейне р. Зеравшан определен также годовой баланс аккумуляции и таяния твердых осадков на ледниках и во внеледниковой области и разработан новый метод расчета и картирования пространственной изменчивости максимальной высоты снеговой границы.

1. Введение

В зависимости от расположения замыкающего гидрологического створа основные притоки Зеравшана, Вахша, Пянджа и большинство других водоемов в пределах Памира и Гиссаро-Алая относятся к рекам снегово-ледникового и ледниково-снегового типов формирования стока. Площадь водосбора р. Зеравшан выше гидропоста Дупули равна 10 200 км², а оледенения в 1957 г. — 674 км² [4], и здесь внутригодовое распределение стока этой реки относится к снегово-ледниковому типу. Средний годовой приток воды на территорию бассейна р. Зеравшан ниже поста Дупули 4,86 км³, и его основные потребители — это сельское хозяйство, промышленность и население республик Узбекистан и Таджикистан. Существенную роль в сезонном стоке р. Зеравшан играет оледенение, объем которого в 1957 г. составлял 34,8 км³. Объективным методом оценки водных ресурсов и их управления в областях формирования и использования стока в бассейнах рек Центральной Азии служит составление водного и водохозяйственного балансов. Для начального этапа исследования проблемы в целом поставлена задача определения годовых объемов составляющих водного баланса в области формирования стока р. Зеравшан. Критерием качества расчетов принята относительная разность между измеренным и рассчитанным годовым стоком.

* Институт географии Российской академии наук.

2. Постановка задачи

Запишем уравнение годового водного баланса (км^3) для рек снегово-ледникового типа питания в виде

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

где R — сток, P — осадки, W_{gl} — таяние многолетних запасов льда и фирна, E — испарение, ΔW — динамические запасы воды в бассейне, K_R — коэффициент трансформации в сток объема воды, поступившей на поверхность бассейна. Исходным временным интервалом для анализа изменчивости значений стока и его климатических факторов принят календарный год. В уравнении (1) многолетний ряд объемов стока — непосредственно измеряемая характеристика, а для определения других составляющих будем применять различные методы расчета. В частности, общий вид формул для расчета осадков и испарения следующий: $P = \bar{x}F_{\text{bas}}$ и $E = \bar{y}F_{\text{bas}}$. Здесь $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — соответственно средние слои осадков и испарения, F_{bas} — площадь бассейна до замыкающего гидроствора. Характерным свойством внутригодового гидрографа стока р. Зеравшан, а также крупных притоков Вахша и Пянджа является малое изменение расходов воды или почти полное его отсутствие в течение января — марта. Сток реки в это время формируется в основном за счет динамических запасов в водоносных горизонтах, и, следовательно, есть основания приравнять объем стока в течение января — марта величине ΔW в уравнении (1). Что касается объема таяния многолетних запасов льда и фирна, то для определения этой составляющей уравнения (1) использована физико-статистическая модель РЕГМОД процессов аккумуляции и абляции снега и льда в гляциальных областях Центральной Азии, подробно изложенная в работах [6—8, 17]. Согласно модели РЕГМОД,

$$W_{\text{gl}} = \sum_{D_{si}}^{D_{ei}} v_{im}(t) + v_i(t) + v_f(t), \quad (2)$$

где D_{si} и D_{ei} — даты начала и конца периода таяния льда, v_{im} , v_i , v_f — соответственно объемы таяния льда под мореной, открытого льда и старого фирна. Расчет W_{gl} по модели [7, 8] включает ряд методов, обеспечивающих описание внутригодового процесса суммарного таяния ледников и ледникового стока. К ним относятся: а) локальные и региональные формулы интенсивности таяния снега, открытого льда и льда под мореной, которые получены для большинства гляциальных областей Средней Азии и тщательно проверены на независимом материале; б) метод расчета дат начала и окончания периода таяния льда и формирования ледникового стока, основанный на раздельном учете движения сезонной снеговой границы Z_{ssl} на ледниках и во внеледниковых зонах водосбора; в) метод расчета движения снеговой границы $Z_{ssl}(t)$ на ледниках в течение абляционного периода; г) новый метод [6, 16] пространственной экстраполяции данных нескольких опорных метеорологических станций. В методе расчета альбедо A_k применяются установленные ранее [7, 8] средние значения A_k основных типов поверхности ледника, вывод об устойчивости во времени A_k для однородной поверхности ледника и экспериментальная редукционная функция,

которая описывает изменение $A_k(t)$ на площади языка ледника в зависимости от отношения площадей сплошной морены и открытого льда.

Рассмотрим на примере осадков, следуя работе [1], расчетную схему определения среднего для заданной площади значения некоторой переменной. В случае сравнительно однородного пространственного распределения осадков их средний слой $\bar{x}$ в бассейне равен

$$\bar{x} = \frac{1}{F_{\text{bas}}} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} x(z) \frac{dF_{\text{bas}}}{dz} dz. \quad (3)$$

Подставляя в это выражение

$$x(z_0) = az_0^2 + bz_0 + c, \quad (4)$$

согласно наиболее общей зависимости, получим:

$$\bar{x} = \frac{x(z_0)}{F_{\text{bas}}} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} [1 + k_2(z - z_0) + k_3(z - z_0)^2] \frac{dF_{\text{bas}}}{dz} dz. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$\tilde{z} = \frac{1}{F_{\text{bas}}} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} z \frac{dF_{\text{bas}}}{dz} dz$$

является средней взвешенной высотой для площади бассейна в пределах $z_{\min} \text{---} z_{\max}$, а

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{F_{\text{bas}}} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (z - \tilde{z})^2 \frac{dF_{\text{bas}}}{dz} dz$$

представляет собой дисперсию высот в бассейне, в [1] для определения среднего слоя осадков на площади водосбора в пределах $z_{\min} \text{---} z_{\max}$ получено уравнение

$$\bar{x} = x(z_0)[1 + k_2(\tilde{z} - z_0) + k_3(\tilde{z} - z_0)^2] + x(z_0)k_3\sigma_z^2, \quad (6)$$

где первый член в правой части представляет количество осадков на уровне средней взвешенной высоты $\tilde{z}$, т. е. $\bar{x} = x(\tilde{z})$, а k_2 и k_3 — эмпирические коэффициенты, которые зависят от $x(z_0)$ и параметров в формуле (4). Из (6) следует, что для любых линейных и квадратичных функций имеет место строгое равенство между осредненной величиной зависимой переменной и ее значением на средней взвешенной высоте бассейна. Этот важный вывод будет неоднократно использован в дальнейшем изложении.

В условиях горного рельефа весьма вероятно, что одномерная зависимость $x = x(z)$ окажется недостаточно эффективной для описания неоднородного, анизотропного поля осадков в крупном речном бассейне. Тогда при наличии достаточного количества исходных данных решение задачи может быть получено (см., например, [12]) путем подбора эмпирических коэффициентов в уравнении $\bar{x} = f(z, L, F)$, а именно:

$$\begin{aligned} \bar{x}(z, L, F) = & x(z_0, L_0, F_0)[1 + k_2(z - z_0) + k_3(z - z_0)^2 + k_4(L - L_0) + \\ & + k_5(L - L_0)^2 + k_6(z - z_0)(L - L_0) + k_7(F - F_0) + k_8(F - F_0)^2 + \\ & + k_9(z - z_0)(F - F_0) + k_{10}(L - L_0)(F - F_0)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь L и F — пространственные (географические) координаты, а $k_2—k_{10}$ — относительные параметры, определяемые с помощью зависимостей $x = x(z, L, F)$ и координат опорной метеорологической станции. Для описания многолетней изменчивости испарения на средней взвешенной высоте бассейна использовано известное и неоднократно проверенное [2] уравнение Ольдекопа:

$$E(\tilde{z}) = PE(\tilde{z}) \operatorname{th} \frac{x(\tilde{z})}{PE(\tilde{z})}, \quad (8)$$

где $PE(\tilde{z})$ — наибольшая возможная величина испарения при данных условиях увлажнения, которая рассчитывается по формуле Романенко [19]:

$$PE = 0,0018(25 + T)^2(100 - H_R). \quad (9)$$

Здесь PE — в мм/мес, T — температура воздуха, °С, H_R — относительная влажность, %. Исследование и контроль различных методов расчета испарения показали [19], что формула Романенко позволяет получать результаты, близкие к данным испарителя.

3. Пространственно-временная изменчивость метеорологических величин

В общем случае вектор аргументов, определяющих пространственную вариацию осадков, температуры и влажности воздуха, должен включать, по крайней мере, пять переменных: географические координаты, высоту над уровнем моря, уклон и ориентацию элементарной площадки. В связи с ограниченностью числа пунктов регулярных наблюдений, особенно в высокогорных областях Центральной Азии, как правило, в гидрологических расчетах используются одномерные эмпирические зависимости [11] и более редко многомерные уравнения [1, 12, 16]. Для решения поставленной задачи был подготовлен архив многолетних (1961—1990 гг.) данных [5, 14, 15] об осадках и температуре воздуха метеорологических станций, находящихся в бассейне р. Зеравшан и соседних водосборах. Список этих станций приведен в табл. 1. Для уточнения вида зависимости осадков от высоты местности в гляциальной области бассейна р. Зеравшан использованы рассчитанные значения аккумуляции — абляции на высоте границы питания ледников.

Поскольку определение средних по площади компонентов водного баланса в бассейне р. Зеравшан рассматривается в рамках одномерной задачи, основной целью данного раздела работы является получение однофакторных эмпирических формул: $P_Y = f(z)$, $T_Y = f(z)$, $T_S = f(z)$, $e_Y = f(z)$, где P_Y — годовая сумма осадков, T_Y и T_S — соответственно средняя за год и лето температура воздуха, e_Y — среднее за год парциальное давление водяного пара. Тем не менее, с прицелом на перспективу, были проанализированы также возможности получения соответствующих многомерных уравнений.

Осадки. В результате численных экспериментов с данными измерений и расчетов осадков для бассейна р. Зеравшан были получены вполне удовлетворительная зависимость средней многолетней годовой суммы осадков $P_Y = f(z)$ и соответствующая ей эмпирическая формула:

Таблица 1

Исходная информация для построения зависимостей $T_Y = T(z)$ и $P_Y = P(z)$

Метеостанция	Долгота, град в.	Широта, град с.	Высота над уровнем моря, м	Данные
Самарканд	67,00	39,70	726	P, T
Богарное	67,45	39,93	748	P, T
Душанбе-агро	68,78	38,58	790	T
Дуаба	68,38	39,97	950	P, T
Уратюбе	68,98	39,90	1004	P, T
Пенджикент	67,60	39,50	1016	P, T
Файзабад	69,32	38,55	1215	T
Исфана	69,52	39,83	1300	P, T
Санзар	68,02	39,72	1313	P, T
Гарм	69,95	39,00	1316	T
Сангистон	68,62	39,38	1502	P, T
Тавильдара	70,48	38,70	1616	T
Бустонабад	69,63	38,67	1983	T
Ляйрун	70,90	38,90	2008	T
Искандеркуль	68,38	39,10	2204	P, T
Мадрушкент	69,65	39,43	2234	P, T
Дехавз	70,20	39,45	2561	P, T
Ледник Северцова	67,65	39,12	2780	P, T
Шахристанский пер.	68,58	39,57	3143	P, T
Хабурабад	70,70	38,63	3347	T
Анзобский пер.	68,87	39,08	3373	P, T

$$\bar{P}_Y = 204,2z^2 - 631,1z + 605,7. \quad (10)$$

Коэффициент детерминации для уравнения (10) равен 0,937, среднеквадратичная ошибка расчета $\bar{P}_Y$ — 31 мм. Для построения зависимости использованы данные шести метеостанций в бассейне Зеравшана, обобщенные локальные связи $\bar{P}_Y = f(z)$ из [10] для составляющих р. Зеравшан — Матчи и Искандер-Дарьи — и рассчитанное количество твердых осадков на высоте границы питания для восьми групп ледников.

После подстановки в (6) эмпирических значений коэффициентов k_2 и k_3 , значений $\tilde{z}$ и σ_z^2 , высоты опорной метеостанции Искандеркуль формула для расчета многолетнего ряда годовой суммы осадков на площади бассейна р. Зеравшан имеет вид

$$P_Y(\tilde{z}, t) = 3,816F_{\text{bas}} P_Y(z_0, t), \quad (11)$$

где $P_Y(z_0, t)$ — сумма осадков на метеостанции Искандеркуль, F_{bas} — площадь бассейна р. Зеравшан. С целью расширения возможностей экспериментирования с осадками как членом уравнения водного баланса в (6) были использованы также данные метеостанции Мадрушкент.

Температура воздуха. Тесные зависимости средней за год и летний сезон температуры воздуха от высоты местности, построенные по данным метеостанций из табл. 1, позволили получить эмпирические формулы, необходимые для расчета многолетнего ряда абляции и других составляющих уравнения водного баланса на средней взвешенной высоте бассейна р. Зеравшан:

$$\bar{\Theta}_S = 30,69 - 6,456z, \quad (12)$$

$$T_S(\tilde{z}, t) = T_S(z_0, t) - 5,78, \quad (13)$$

$$\bar{\Theta}_Y = 18,31 - 5,618z, \quad (14)$$

$$T_Y(\tilde{z}, t) = T_Y(z_0, t) - 5,03. \quad (15)$$

Здесь $\bar{\Theta}_S$, T_S и $\bar{\Theta}_Y$, T_Y — соответственно средняя за лето и год температура воздуха, z — высота над уровнем моря (м). Квадрат коэффициента корреляции (R^2) для уравнения (12) равен 0,98, а для (14) — 0,97. В формулах (13) и (15) используются данные метеостанции Искандеркуль. Большие значения R^2 для зависимостей (12) и (14) позволяют считать, что одномерные выражения вполне адекватно описывают пространственную изменчивость температуры воздуха.

Парциальное давление водяного пара и относительная влажность воздуха. Численное описание пространственной изменчивости парциального давления водяного пара основано на данных 23 метеорологических станций, расположенных в следующих интервалах: по высоте от 309 до 4169 м над уровнем моря, по долготе от 67 до 78,40° в., по широте от 37,28 до 42,70° с. По этим данным построена зависимость $\bar{e}_Y = f(z)$ и получено следующее одномерное выражение:

$$\bar{e}_Y = 9,96 - 2,013z, \quad (16)$$

а также по аналогии с (15) формула для расчета многолетнего ряда парциального давления водяного пара на средней взвешенной высоте бассейна р. Зеравшан:

$$e_Y(\tilde{z}, t) = 0,615e_Y(z_0, t). \quad (17)$$

Для (16) R^2 равен 0,92. В (17) используются данные метеостанции Искандеркуль. В результате дополнительного анализа пространственной вариации $\bar{e}_Y$ выявлена возможность увеличения числа аргументов в уравнении (16) и получена более общая формула для Центральноазиатского региона:

$$\bar{e}_Y = 16,62 - 2,130z - 0,363\varphi + 0,115\lambda, \quad (18)$$

где φ — широта, λ — долгота.

Объясняемая доля дисперсии функции (или квадрат коэффициента корреляции) для (18) равен 0,95, среднеквадратичная ошибка расчета 0,56 гПа. Однако, учитывая специфическую форму бассейна р. Зеравшан, в расчетах парциального давления водяного пара была использована формула (17).

В разделе 2 было показано, что для определения объема испарения требуются данные об относительной влажности воздуха H_R на средней взвешенной высоте речного бассейна. Существующая сеть метеостанций не позволяет напрямую получить уравнения для расчета H_R , аналогичные формулам (16) и (17). Воспользуемся для этой цели общим выражением относительной влажности воздуха

$$H_R = e(\tilde{z})/e_N(\tilde{z}),$$

где многолетний ряд парциального давления водяного пара e_N , насыщенного при данной температуре воздуха, найдем по формуле Магнуса

$$e_N(\tilde{z}, t) = 6,1 \cdot 10^{\frac{7,45T_Y(\tilde{z}, t)}{235 + T_Y(\tilde{z}, t)}}, \quad (19)$$

а расчет $e(\tilde{z})$ выполним по уравнению (17). Таким образом, в разделах 2 и 3 описаны все методы и исходные данные, использованные для определения временной изменчивости объемов осадков и испарения как составляющих уравнения водного баланса в бассейне р. Зеравшан.

4. Расчет стока по уравнению водного баланса

Далее были проведены численные эксперименты с целью оптимизации состава исходных данных в уравнениях (11), (15) и (17), обеспечивающего наилучшее совпадение рассчитанного и измеренного годового стока р. Зеравшан в течение 1935—1990 гг. Так, для расчета количества осадков и температуры воздуха на средней взвешенной высоте бассейна были использованы данные метеостанций Дехавз, Искандеркуль, Мадрушкент и осреднение результатов по отдельным метеостанциям. Окончательный вариант входной информации такой: годовой объем осадков получен путем экстраполяции данных метеостанции Искандеркуль, а температура воздуха — по измерениям на метеостанции Дехавз. При расчете поступления объемов талой воды с площади оледенения учтено линейное сокращение этой площади до 530,4 км² в 1990 г. Результаты определения многолетнего ряда составляющих водного баланса приведены в табл. 2, а на рис. 1 показана их временная изменчивость. Для расчета годового стока по уравнению водного баланса использованы значения коэффициента трансформации K_R , полученные непосредственно из уравнения (1). Значения $K_R \geq 1$ не следует считать артефактом, так как K_R не является коэффициентом стока. Многолетний ряд коэффициентов стока относительно осадков на средней взвешенной высоте бассейна Зеравшана ($\tilde{z} = 3,1$ км над уровнем моря) также приведен в табл. 2, и среднее значение ряда (0,50) за 1935—1962 гг. хорошо согласуется с аналогичной оценкой (0,52), полученной в работе [11]. Путем сравнения измеренного R_m [13] и рассчитанного R_c объемов годового стока установлено: а) относительная разность $dW = (R_m - R_c)/R_m$ имеет систематический характер и в целом за расчетный период находится в интервале от -0,31 до -4,78%; б) коэффициент детерминации уравнения $R_m = f(R_c)$ равен 0,99. Статистический анализ показал также, что dW не имеет значимой связи с R_c , осадками и испарением, а распределение dW соответствует нормальному. Кроме того, модуль разности R_m и R_c в среднем составил примерно 1/5 суммы двух наименее значимых компонентов уравнения водного баланса — W_{gl} и ΔW . Сравнение статистических параметров рядов измеренного и рассчитанного стока (см. табл. 2) также демонстрирует вполне удовлетворительное их совпадение. Эти оценки характеризуют качество расчетов стока как несомненно высокое, учитывая, что суммарная предельная ошибка определения среднего годового расхода горных рек (по средним месячным данным) составляет 5—16% [3]. При анализе статистической обеспеченности климатических величин (осадки, средняя за лето температура воздуха) в годы с экстремальными объемами ледникового стока установлено, что эти объемы фор-

Таблица 2

**Многолетний ряд составляющих годового водного баланса
в бассейне р. Зеравшан**

Год	R_m	R_c	$P_y(\tilde{z})$	$E(\tilde{z})$	W_{gl}	ΔW	K_R	C_R	$dW, \%$
	$км^3$								
1935	4,359	4,476	11,095	4,908	0,329	0,285	0,64	0,38	-2,69
1936	4,713	4,800	6,579	3,236	0,634	0,264	1,14	0,70	-1,86
1937	4,444	4,509	7,046	3,429	0,371	0,243	1,07	0,62	-1,47
1938	4,203	4,309	9,460	4,401	0,069	0,281	0,79	0,43	-2,52
1939	4,387	4,462	8,448	4,050	0,543	0,244	0,85	0,51	-1,70
1940	4,490	4,547	9,966	4,689	0,101	0,245	0,80	0,44	-1,27
1941	6,322	6,429	14,599	6,293	1,033	0,331	0,65	0,42	-1,69
1942	6,250	6,334	14,248	5,900	0,931	0,302	0,65	0,43	-1,35
1943	4,955	5,037	10,433	4,775	0,783	0,264	0,74	0,46	-1,65
1944	4,493	4,645	6,540	3,229	1,154	0,302	0,97	0,67	-3,39
1945	4,853	4,896	9,071	4,225	0,554	0,228	0,86	0,52	-0,90
1946	4,696	4,784	9,382	4,437	0,327	0,276	0,86	0,49	-1,86
1947	4,304	4,411	9,382	4,430	1,014	0,260	0,70	0,45	-2,48
1948	4,899	4,953	8,564	4,042	0,525	0,242	0,93	0,56	-1,11
1949	5,371	5,431	11,056	4,816	0,252	0,267	0,80	0,47	-1,12
1950	4,870	5,028	6,968	3,400	0,842	0,333	1,06	0,68	-3,24
1951	3,824	3,993	10,745	4,827	0,601	0,312	0,56	0,35	-4,41
1952	5,791	5,838	11,951	5,243	0,003	0,280	0,83	0,47	-0,81
1953	5,119	5,208	14,637	5,938	0,495	0,274	0,54	0,34	-1,74
1954	5,310	5,399	10,667	4,652	0,018	0,301	0,85	0,49	-1,67
1955	4,765	4,891	8,642	4,104	0,592	0,307	0,89	0,54	-2,63
1956	5,205	5,297	7,708	3,784	0,849	0,283	1,05	0,66	-1,77
1957	3,530	3,646	7,630	3,639	0,199	0,261	0,81	0,45	-3,29
1958	5,419	5,473	15,066	6,065	0,008	0,259	0,58	0,35	-1,00
1959	5,785	5,842	11,056	4,984	0,252	0,285	0,88	0,51	-0,97
1960	4,843	4,955	9,538	4,510	0,754	0,293	0,81	0,50	-2,31
1961	4,697	4,799	9,032	4,256	1,052	0,267	0,78	0,51	-2,18
1962	3,899	4,036	7,903	3,769	0,336	0,293	0,84	0,48	-3,51
1963	4,464	4,541	10,472	4,712	0,046	0,259	0,74	0,42	-1,72
1964	5,259	5,339	14,209	5,556	0,062	0,274	0,58	0,36	-1,53
1965	4,122	4,248	8,564	4,018	0,539	0,283	0,78	0,47	-3,06
1966	5,016	5,120	11,484	4,994	0,020	0,304	0,74	0,43	-2,08
1967	4,112	4,255	10,277	4,606	0,597	0,296	0,63	0,39	-3,48
1968	5,460	5,549	13,898	5,601	0,371	0,287	0,61	0,38	-1,62
1969	5,733	5,908	17,635	6,094	0,005	0,375	0,48	0,32	-3,06
1970	6,057	6,116	10,667	4,781	0,017	0,306	0,98	0,55	-0,97
1971	5,089	5,244	7,007	3,460	0,434	0,357	1,23	0,71	-3,04
1972	4,262	4,386	13,547	5,248	0,057	0,281	0,49	0,31	-2,91
1973	6,353	6,373	12,341	5,253	0,229	0,262	0,84	0,50	-0,31
1974	3,949	4,053	14,482	5,518	0,043	0,249	0,42	0,27	-2,66
1975	4,147	4,291	6,774	3,304	0,783	0,294	0,94	0,60	-3,48
1976	4,668	4,787	11,873	5,130	0,645	0,289	0,61	0,38	-2,55
1977	4,892	5,008	10,238	4,637	0,292	0,308	0,80	0,47	-2,36
1978	5,595	5,706	12,808	5,447	0,863	0,309	0,66	0,43	-1,98
1979	5,598	5,762	12,691	5,405	0,078	0,382	0,73	0,43	-2,92
1980	4,695	4,828	13,742	5,777	0,812	0,300	0,52	0,33	-2,85
1981	4,802	4,882	11,990	5,050	0,016	0,267	0,66	0,39	-1,67
1982	3,661	3,821	9,109	4,165	0,482	0,300	0,65	0,39	-4,39
1983	5,017	5,130	10,122	3,794	0,504	0,283	0,71	0,48	-2,26
1984	5,100	5,250	11,095	4,776	1,046	0,325	0,67	0,45	-2,95
1985	4,537	4,646	8,954	4,189	0,037	0,300	0,91	0,50	-2,40
1986	3,804	3,921	7,280	3,487	0,393	0,267	0,87	0,51	-3,09
1987	5,101	5,176	15,727	5,648	0,013	0,255	0,49	0,32	-1,46
1988	5,742	5,859	11,601	4,535	0,017	0,330	0,78	0,48	-2,04
1989	3,918	4,106	9,460	4,240	0,272	0,340	0,69	0,40	-4,78
1990	5,408	5,508	9,460	4,309	0,151	0,318	0,98	0,56	-1,85
$Av(T_1)$	4,850	4,944	9,908	4,501	0,522	0,278	0,82	0,50	
$Av(T_2)$	4,877	4,993	11,340	4,776	0,315	0,300	0,72	0,44	
$\sigma(T_1)$	0,674	0,659	2,440	0,840	0,348	0,026			
$\sigma(T_2)$	0,717	0,702	2,629	0,753	0,311	0,034			
$C_v(T_1)$	0,14	0,13	0,25	0,19	0,67	0,10			
$C_v(T_2)$	0,15	0,14	0,23	0,16	0,99	0,11			

Примечание. R_m — измеренный сток; R_c — сток, рассчитанный по уравнению (1); $P_y(\tilde{z})$ — количество осадков; $E(\tilde{z})$ — испарение, W_{gl} — ледниковый сток, ΔW — динамический запас воды; $K_R = (R - \Delta W)/(P - E + W_{gl})$; $C_R = R_m/P_y(\tilde{z})$; $dW = (R_m - R_c)/R_m$; Av — среднее; T_1 — период 1935—1962 гг.; T_2 — период 1963—1990 гг.; σ — среднеквадратичное отклонение; C_v — коэффициент вариации.

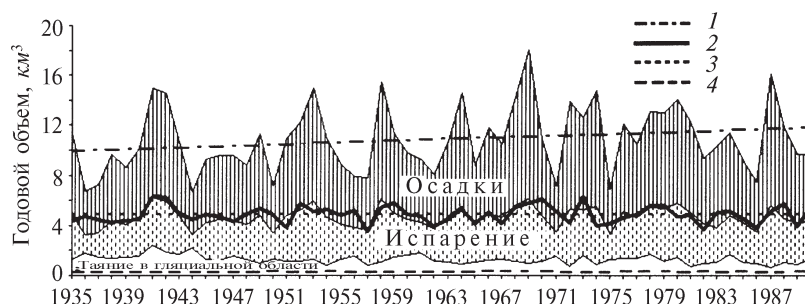


Рис. 1. Многолетние ряды составляющих водного баланса в бассейне р. Зеравшан.

1 и 3 — тренды рядов осадков и стока; 2 — сток р. Зеравшан; 4 — динамический запас воды.

мируются, как правило, при достаточно редкой повторяемости одного из климатических факторов или их сочетаний. Так, в экстремально многоводные 1944 и 1984 гг. обеспеченность годовой суммы осадков была соответственно 98,7 и 35,0%, сезонной температуры воздуха — 8,4 и 1,3%. В экстремально маловодные 1958 и 1987 гг. аналогичные характеристики были равны для осадков 4,9 и 3,1%, для температуры воздуха — 84,5 и 95,1%. В годы, когда обеспеченность W_{gl} отличается от нормы до $\pm 40\%$, устойчивой зависимости с квантилями распределения количества осадков и средней за лето температуры воздуха не получено. Таким образом, полученные результаты позволяют считать описанные в работе методы расчета пространственно-временной изменчивости составляющих уравнения водного баланса достаточно надежными и пригодными для других бассейнов Центральной Азии со сходным типом формирования стока. Для бассейна р. Зеравшан практически важными и интересными являются следующие выводы: а) статистические параметры рядов стока и испарения оказались весьма близкими (в том числе тренды этих рядов); б) в многолетнем ряду объемов осадков обнаружен значимый положительный тренд; в) в связи с сокращением площади оледенения вклад ледникового стока в питание реки заметно уменьшился в конце расчетного периода по сравнению с его началом.

5. Расчет и картирование максимальной высоты снеговой границы

Сведения о максимальной высоте снеговой границы $Z_{\max}$ представляют большую ценность для гидрологических и гляциологических расчетов и прогнозов, так как этот показатель характеризует площадь с положительным балансом аккумуляции и таяния твердых атмосферных осадков и соответственно ресурсы годового и сезонного стока с ледников и внеледниковых областей речного бассейна. Для данного исследования осредненные значения $Z_{\max}$ на ледниках, служащие показателем высотной границы питания, заимствованы из Каталога ледников СССР [4]. С целью определения $Z_{\max}$ во внеледниковых областях запишем уравнение годового баланса аккумуляции и таяния осадков в виде

$$P_Y(z) - M_S(z)\Delta t = 0, \quad (20)$$

где $P_Y(z)$ — годовая сумма осадков (мм), $M_S(z)$ — средняя за сутки интенсивность таяния в июне — августе, $M_S(z)\Delta t$ — суммарный за период Δt (июнь — август) слой таяния (абляции) (мм). Решение в общем виде уравнения (20) применительно к бассейну р. Зеравшан получено путем подстановки в него формулы (10) и аналитического выражения средней за сутки интенсивности таяния на ледниках Средней Азии в июне — августе из [18]:

$$M_S(z) = \alpha T_S(z) + \beta, \quad (21)$$

где $\alpha = \text{const} (\sim 0,57)$,

$$\beta = 0,261z - 0,33\varphi + 0,09\lambda + 6,72. \quad (22)$$

В (21) для определения $T_S(z)$ используется формула (12). В конечном счете после подстановки в (20) всех необходимых выражений получаем квадратное уравнение

$$204,44z^2 + 2511,16z - (21670,5 + 303,6\varphi - 82,8\lambda) = 0, \quad (23)$$

где в пункте с заданными географическими координатами сумма членов в скобках является известным параметром $C = 303,6\varphi - 82,8\lambda - 21670,5$. Тогда в результате решения квадратного уравнения относительно z получаем искомую высоту, где годовой баланс аккумуляции — абляции равен 0, т. е. $Z_{\max} = Z_{\max}(\varphi, \lambda)$:

$$Z_{\max} = \frac{-2511,16 + \sqrt{2511,16^2 - 4 \cdot 204,22C}}{408,44}. \quad (24)$$

Пространственная изменчивость снеговой границы является функцией баланса аккумуляции и абляции осадков, как на ледниках, так и во внеледниковых областях, поэтому необходимо объединить данные о $Z_{\max}$ для каждого из этих типов поверхности водосбора. Вполне логично сделать это по квазиоднородным участкам (районам) водосборов. Границы этих районов в бассейнах рек Центральной Азии следует выделять на основе орографических, гидрографических, климатических или иных критериев. Следовательно, площадь каждого из таких районов представляет собой сумму площадей двух типов поверхности водосбора, имеющих индивидуальные значения $Z_{\max}$. Для бассейна р. Зеравшан в качестве орографического критерия на первом уровне районирования целесообразно использовать главные водоразделы Туркестанского, Гиссарского и Зеравшанского хребтов, служащие естественными границами водосбора. Следующим этапом проведения границ районов является выделение в основном морфологически однородных групп ледников, привязанных к преобладающей ориентации макросклонов вышеуказанных хребтов. Таким способом в пределах данного водосбора были идентифицированы 34 района, затем для каждого района было рассчитано среднее взвешенное по площади двух типов поверхности единое значение $Z_{\max}$ и получена обобщающая эмпирическая формула, которая описывает пространственную изменчивость $Z_{\max}$ с учетом особенностей режима этого показателя на ледниках и во внеледниковых областях бассейна р. Зеравшан:

Рис. 2. Пространственная изменчивость максимальной высоты снеговой границы в бассейнах рек Зеравшан и Фандарья.

Жирной линией показан главный водораздел в бассейнах рек Зеравшан и Фандарья, диагональной штриховкой выделена площадь водосбора на высоте более 3,7 км над уровнем моря, пунктиром показаны изолинии максимальной высоты снеговой границы.

$$Z_{\max}^* = 0,3493 - 0,0414\lambda_*^4 - 0,3234\lambda_*^3 - 0,3106\lambda_*^2 - 0,1457\lambda_* + 0,3657\varphi_* \quad (25)$$

(звездочка — символ нормализации). Коэффициент детерминации для этого уравнения равен 0,73. С помощью (25) были рассчитаны значения $Z_{\max}$ в узлах регулярной сетки, покрывающей бассейн р. Зеравшан, которые были использованы для получения методом кригинга системы изолиний, характеризующих пространственную изменчивость $Z_{\max}$ в пределах заданной регулярной сетки. Далее на эту промежуточную схему распределения $Z_{\max}$ была наложена маска площади бассейна на высотах более 3700 м и получена окончательная картина пространственной изменчивости $Z_{\max}$ на территории, ограниченной изогипсой 3700 м и водоразделами Туркестанского, Гиссарского и Зеравшанского хребтов. Эта картина (см. рис. 2) существенно отличается от аналогичной схемы в [9] и от варианта прямого построения системы изолиний только по данным о высоте границы питания на ледниках. В результате применения маски площади бассейна в заданном интервале высот впервые выявлена область водосбора, где изолинии максимальной высоты снеговой границы характеризуют пространственную изменчивость водных ресурсов в бассейне со снегово-ледниковым типом формирования стока. Так, для определения площади с положительным за год балансом аккумуляции и абляции твердых осадков следует получить по формуле (25) набор отдельных значений $Z_{\max}$ и затем среднее значение этой величины внутри контура заданной части бассейна. Необходимо также определить локальный максимум $z_{\lim}$ высоты рельефа на заданном участке поверхности. Искомая площадь равна $F_{\text{bas}}(z_{\lim}) - F_{\text{bas}}(\overline{Z_{\max}})$. Используя метод расчета среднего слоя осадков, изложенный в разделе 1, и формулу (21), нетрудно в итоге найти баланс годового объема аккумуляции — абляции для этой площади. В рассматриваемом случае высота 3700 м является нижним пределом средней взвешенной границы питания на ледниках в группе из 34 районов.

6. Заключение

На примере бассейна р. Зеравшан показано, что изложенные методы расчета годовых объемов осадков, испарения, ледникового питания и ди-

намических запасов воды обеспечивают качество расчетов стока, сравнимое с данными его измерений. Вместе с тем расчет составляющих годового водного баланса следует рассматривать как один из этапов в многоступенчатой системе описания и прогноза многолетнего режима стока рек Центральной Азии. На более высоком по детальности уровне описания необходимо повышать размерность уравнений (10), (14), (16) и учитывать пространственно-временную изменчивость эмпирических коэффициентов. Например, в итоге детализации уравнения (14) с целью расчета внутригодового хода средней месячной температуры получена эмпирическая формула

$$\overline{\Theta}(z, \tau) = (0,07\tau^2 - 0,89\tau - 3,65)z - 0,86\tau^2 + 11,80\tau - 11,68 \quad (26)$$

(τ — порядковый номер календарного месяца). К дальнейшему усложнению формул (10), (14), (16) приведет описание эмпирических параметров как функций географических координат, и это неизбежно для повышения качества применяемых моделей и их востребованности. Основой для последующей детализации расчета осадков и парциального давления водяного пара служат также уравнения (7) и (18).

Анализ результатов расчета и моделирования составляющих годового водного баланса в бассейне р. Зеравшан позволил сформулировать следующее. Среднее значение коэффициента трансформации годового стока за 1935—1990 гг. равно 0,77, а коэффициента стока относительно осадков за это же время — 0,47. Отмечено уменьшение обоих коэффициентов в 1963—1990 гг. относительно их значений за период 1935—1962 гг. Объем талого стока, образовавшийся вследствие сокращения площади оледенения в бассейне р. Зеравшан, не изменил слабого отрицательного тренда общего стока в 1935—1990 гг. Многолетняя изменчивость средних за год метеорологических величин (осадки, температура воздуха, парциальное давление водяного пара) на средней взвешенной высоте этого водосбора в 1935—1990 гг. характеризуется заметным положительным трендом.

Методической основой расчета и картирования максимальной высоты снеговой границы $Z_{\max}$ служит очевидный постулат о пространственной непрерывности $Z_{\max}$ на ледниках и внеледниковых областях водосбора. Граница общего пространства существования $Z_{\max}$ выделяется с помощью ГИС и цифровой модели рельефа путем маскирования интервала высот от минимального значения границы питания на ледниках до главного водораздела речного бассейна.

Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ (05-05-64296).

Литература

1. Боровикова Л. Н., Денисов Ю. М., Трофимова Е. Б., Шенцис И. Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек. — Труды САНИГМИ, 1972, вып. 61 (76), 150 с.
2. Будыко М. И., Зубенок Л. И. Определение испарения с поверхности суши. — Известия АН СССР, сер. географическая, 1961, № 6, с. 3—17.

3. Карасев И. Ф., Чижев А. Н. О точности определения стока по гидрометрическим данным. — Метеорология и гидрология, 1969, № 2, с. 78—84.
4. Каталог ледников СССР. Вып. 3. Амударья, ч. 1—2. — Л., Гидрометеиздат, 1982, 108 с.
5. Климатологический справочник СССР. Метеорологические данные за отдельные годы. Температура воздуха и осадки на станциях Казахской, Киргизской, Таджикской, Туркменской и Узбекской ССР. Вып. 18, ч. 1—2; вып. 19, ч. 1—2; вып. 30, ч. 1—2; вып. 31, ч. 1—2; вып. 32, ч. 1—2, 1952—1974.
6. Коновалов В. Г. Пространственная экстраполяция и изменчивость характеристик климата на территории Центральной Азии. — Известия РАН, сер. географическая, 2003, № 5, с. 97—106.
7. Коновалов В. Г. Расчет и прогноз таяния ледников Средней Азии. — Л., Гидрометеиздат, 1979, 230 с.
8. Коновалов В. Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. — Л., Гидрометеиздат, 1985, 237 с.
9. Котляков В. М., Рототаева О. В., Лебедева И. М. и др. Оледенение Памиро-Алая. — М., Наука, 1993, 256 с.
10. Основные гидрологические характеристики и Государственный водный кадастр СССР. Т. 14, вып. 3. Бассейн р. Амударья. — Л., Гидрометеиздат, 1976, 434 с.; 1980, 443 с.
11. Шенцис И. Д. Метод расчета крупномасштабного поля осадков в горах. — Труды САРНИГМИ, 1982, вып. 94 (175), с. 40—52.
12. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. — Л., Гидрометеиздат, 1965, 691 с.
13. Bodo B. A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the Former Soviet Union [FSU]. — Toronto, Canada, 2000, vol. 1.0.
14. Forme r Soviet Union Monthly Precipitation Archive, 1891—1993. — NSIDC-0059, Boulder, USA, <http://www-nsidc.colorado.edu/>.
15. Global Historical Climatological Network Database. GHCN, Version 2. <ftp://www.ncdc.noaa.gov/>.
16. Konovalov V. G. Miltidimensional description of the fields of meteorological elements for mathematical modeling of natural processes. /In: Precipitation Variability and Climate Change, B. Sevruc and M. Lapin (eds.). — Proc. of Symp. on Precipitation and Evaporation, vol. 2, Bratislava, Slovakia, 20—24 September 1993, pp. 167—175.
17. Konovalov V. G. Regional model of runoff for high mountain basins: Main components and results of realization in the Pamirs and Hidukush river basins. — Data of Glaciological Studies, Moscow, 1997, No. 81, pp. 21—29.
18. Konovalov V. G., Karandaeva L. M., and Ratsek I. V. Methods of numerical estimations of the fields of meteorological elements in mountains for glaciation regime computation. — IAHS Pub., 1991, No. 208, pp. 529—541.
19. 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, vol. 12, pp. 429—442.

Поступила
24 XI 2006

LONG-TERM CHANGES OF THE WATER BALANCE COMPONENTS IN THE RIVER BASINS OF SNOW AND MELTED ICE FEEDING

V. G. Konovalov

For the first time, variability of the main components of the annual water balance (precipitation, evaporation, glacier runoff, and dynamic water storage) is studied in the runoff formation area of the Zeravshan River basin during 1935—1990. The long-term Zeravshan runoff data were derived from measurements. The other water balance components were calculated. Averages of variables were determined based on the mean weighted altitude of the watershed, using also local and regional empirical relationships. The runoff of glaciers was computed using the author's model of accumulation and ablation processes in high-mountain areas. The quality control showed that the relative error of the calculated runoff is systematic; it varies from 0.31% to –4.78%. A new method is described for computing and mapping the maximum snowline altitude.