

УДК 551.324.6 + 551.482.4

## РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ СТОКА В БАССЕЙНАХ РЕК ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

© 2015 г. В.Г. Коновалов

*Институт географии РАН, Москва, Россия; vladgeo-exp@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.07.2014 г.

Исследованы различные варианты уравнений для метода сверхдолгосрочных гидрологических прогнозов годового стока рек Центральной Азии: Амударья, Сырдарья, Тарим, Ганг, Инд, Меконг, Брахмапутра, Хуанхэ и Янцзы. В качестве входной информации в уравнениях испытаны годовые значения температуры воздуха, осадков и нормированная разность аномалий этих переменных по данным метеостанций и в узлах регулярной сетки с шагом  $0.5^\circ$  по широте и долготе. Выполнены моделирование, расчет и прогноз объемов ледникового стока и испарения в области абляции оледенения. Входными данными для модели служат: сумма осадков и средние значения температуры и влажности воздуха за летний период, генерализованные высотно-площадные и морфологические параметры оледенения. Расчеты по модели ледникового стока проведены для бассейнов рек Вахш, Пяндж, Зеравшан, Нарын, Брахмапутра.

**Ключевые слова:** Центральная Азия, годовой и ледниковый сток, расчет и прогноз, уравнения регрессии, модель ледникового стока.

**Введение.** Численное описание прошлых, нынешних и будущих изменений речного стока на региональном уровне является предметом интереса для научной гидрологии и многих пользователей в водном хозяйстве, управлении водными ресурсами и их прогнозами. Поскольку поверхностный сток является интегральной суммой входных воздействий, его климатические факторы должны быть выражены в виде полей, например, осадков, температуры воздуха и т.д. Однако вместо оценки полей, как правило, используется концепция репрезентативных или информативных пунктов с целью изучения и использования соотношений между стоком и его климатическими факторами. Этот пункт может быть метеорологической станцией или узлом регулярной сетки с известными характеристиками климата и заданными географическими координатами и высотой над уровнем моря. Априорно первый вариант является более надежным, поскольку он основан на прямых измерениях, однако второй дает возможность использовать выходные результаты модели общей циркуляции атмосферы для оценки и прогноза временных изменений стока. Изучение и проверка информационного потенциала обеих вариантов климатических факторов проведены для ряда крупнейших рек Центральной Азии. Гидрографические характеристики этих рек приведены в табл. 1.

**Основные задачи исследования.** 1. Оценить информационный потенциал прогнозируемых до 2100 г. и ранее климатических норм годовых осадков и температуры воздуха для расчета годового стока ряда крупнейших речных бассейнов Центральной Азии.

2. Моделирование, расчет и прогноз составляющих ледникового стока с поверхности области абляции в бассейнах рек Центральной Азии на основе концепции [3] однородных групп ледников и их параметров.

**Исходные данные.** В качестве климатических факторов стока (Run) рек Амударья и Сырдарья использованы сумма осадков  $P$  за январь–декабрь и средняя за год температура воздуха  $T$ , представленные тремя вариантами данных. Первый – это измерения на 27 метеорологических станциях, расположенных в интервалах: по широте  $37.60^\circ$ – $43.23^\circ$  с. ш., долготе  $62.18^\circ$ – $78.20^\circ$  в. д. и высоте 193–4169 м над у. м. [1, 9, 16, 17, 25]. Второй вариант – значения  $P$  и  $T$  с шагом  $0.5^\circ$  по широте и долготе, извлеченные для региона из Глобального климатического архива [22]. Пространственные границы для этих данных по долготе  $65.0^\circ$ – $78.0^\circ$  в.д., широте  $34.0^\circ$ – $42.0^\circ$  с. ш. и высоте 2000–3000 м над у. м. Третий вариант, относящийся к данным метеорологических станций и сеточным значениям  $P$  и  $T$ , был так называемый

**Таблица 1.** Параметры речных бассейнов и годового стока за 1961–1990 гг.

Речной бассейн /гидропост/	Площадь, $F \times 10^3 \text{ км}^2$	Сток $\text{км}^3/\text{год}$			$C_v$
		среднее	мин	макс	
Аксу (бассейн Тарима)	12.8	7.3	6.3	9.2	0.09
Амударья /Керки/	187.6	63.6	47.6	112.2	0.20
Амударья+Сырдарья	301.9	97.4	76.5	172.0	0.19
Брахмапутра /Бахадурабад/	554.5	628.0	494.7	866.1	0.15
Ганг /Фаракка/	951.6	391.0	255.2	553.5	0.20
Инд /Бешам/	162.4	75.0	57.5	99.6	0.13
Меконг /1/	810.0	475.0	346.6	608.0	0.14
Меконг /2/	391.0	235.1	161.2	309.5	0.15
Меконг /3/	373.0	224.7	158.5	282.6	0.15
Меконг /4/	189.0	86.8	66.2	126.4	0.15
Сырдарья	114.3	33.8	26.0	59.8	0.19
Тарим (сумма 5 рек)	135.8	21.6	17.3	26.6	0.11
Тошкан (бассейн Тарима)	19.2	2.6	1.8	3.8	0.16
Хотан (бассейн Тарима)	34.6	4.6	2.7	7.1	0.20
Хуанхэ /Ханькоу/	730.0	43.6	22.8	85.6	0.32
Хуанхэ /Санмен/	688.4	39.1	20.7	68.2	0.30
Юрункаш (басс. Тарима)	14.6	2.5	1.5	4.0	0.21
Янцзы /Датонг/	1705.4	854.6	645.1	1104.9	0.14
Янцзы /Ханькоу/	1488.0	705.4	569.2	878.2	0.11
Янцзы /Ючан/	1005.5	441.0	359.0	524.0	0.09
Янцзы /Пиншан/	485.1	142.1	111.0	197.8	0.16
Яркенд (бассейн Тарима)	50.4	6.5	4.6	8.7	0.17

$C_v$  – коэффициент вариации.

индекс ( $I_b$ ) баланса [5], определенный в каждом году, как разность безразмерных аномалий  $T$  и  $P$ :  $I_b = I_p - I_T$ , где  $I_T = (T_i - \text{mean}T)/\text{mean}T$ , а  $I_p = (P_i - \text{mean}P)/\text{mean}P$ . Здесь  $P_i$  и  $T_i$  – осадки и температура воздуха в  $i$ -м году,  $\text{mean}T$  и  $\text{mean}P$  – средние значения соответствующих многолетних рядов. Как показано ранее [4, 5], этот индекс обладает хорошей информативностью и используется для повышения качества гидрологических и гляциологических расчетов.

Основными источниками исходных данных по стоку были [10, 14–15, 18, 27]. Для описания изменчивости стока рек как функции осадков и температуры воздуха был выбран интервал времени равный базовому климатическому периоду 1961–1990 гг. Общая продолжительность рядов наблюдений стока и его климатических факторов в бассейнах рек Амударья и Сырдарья составила более 60 лет, что достаточно для получения параметров регрессии в обучающей выборке и их независимой проверки в контрольной выборке.

В качестве исходной информации для поиска зависимостей годового стока от годовых величин осадков и температуры воздуха в бассейнах рек Тарима, Хуанхэ, Янцзы, Инда, Ганга, Меконга,

Брахмапутры использованы данные наблюдений из [17, 19, 24] за общий интервал времени 1961–1990 гг. При этом 148 пунктов измерения осадков находились в интервалах  $79.93^\circ$ – $121.92^\circ$  в. д.,  $22.57^\circ$ – $50.48^\circ$  с. ш. и высоте 500–4613 м над у. м., а 68 пунктов измерения температуры воздуха были расположены в интервалах  $66.90^\circ$ – $119.95^\circ$  в. д.,  $22.57^\circ$ – $47.73^\circ$  с. ш. и высоте 215–4507 м над у. м. Расположение пунктов наблюдений за осадками и температурой воздуха иллюстрирует рисунок.

**Методы исследований.** Множественная линейная регрессия третьего порядка (т.е. для описания функции используются три аргумента) выбрана в качестве общей формы связи между стоком и его климатическими факторами. Специальная компьютерная программа использована для полного перебора возможных комбинаций аргументов в правой части эмпирического уравнения, поиска наивысшего коэффициента корреляции и расчета параметров регрессии. Окончательные результаты определения наиболее эффективных уравнений типа  $Run = f(T)$ ,  $Run = f(P)$  и  $Run = f(I_b)$  представлены в табл. 2 и 3.

В уравнения множественной линейной регрессии 3-го порядка (включают три аргумента для

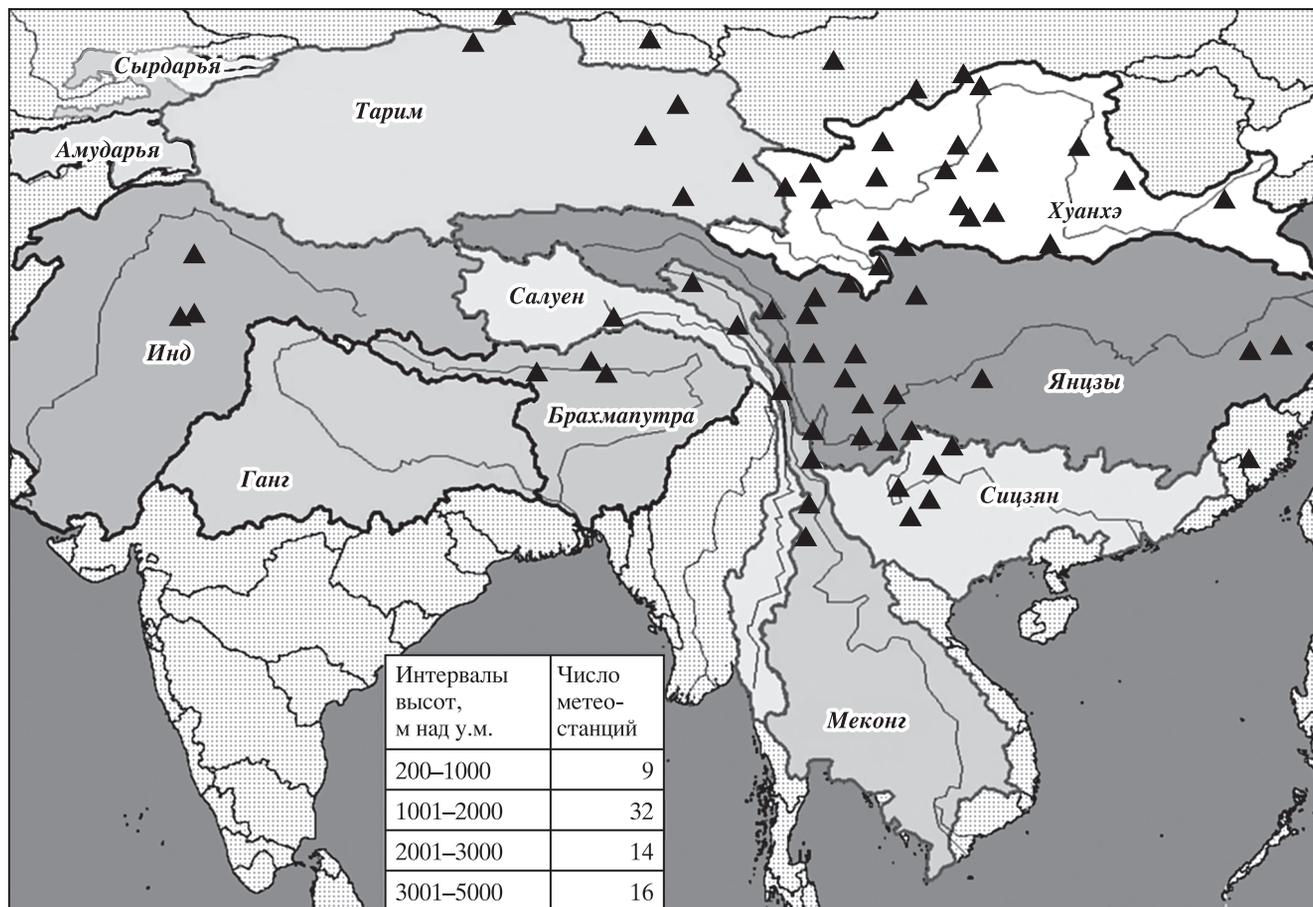


Рисунок. Избранные пункты метеонаблюдений в бассейнах рек Центральной и Высокой Азии.

Таблица 2. Параметры линейной регрессии 3-го порядка для расчета годового стока Амударьи (А) и Сырдарьи (С). По данным 27 мст за 1961–1990 гг.

Речной бассейн	Аргументы								
	температура воздуха			осадки			индекс баланса, $I_b = I_p - I_t$		
	$r$	$\delta R$	$Cr$	$r$	$\delta R$	$Cr$	$r$	$\delta R$	$Cr$
А	0.82	0.06	0.58	0.88	0.04	0.47	0.91	0.03	0.42
А + С	0.77	0.08	0.64	0.86	0.08	0.51	0.88	0.04	0.48
С	0.70	0.10	0.71	0.89	0.04	0.46	0.89	0.04	0.45

Примечание:  $r$  – коэффициент корреляции стока с соответствующим аргументом;  $\delta R$  – ошибка расчета  $r$ ;  $Cr$  – критерий качества эмпирического уравнения (равен отношению  $S_y/\sigma_y$ , где  $S_y$  – ошибка расчета зависимой переменной  $Y$ , а  $\sigma_y$  – стандарт отклонения  $Y$ );  $I_p$  и  $I_t$  – нормированные аномалии годовой суммы осадков и средней годовой температуры воздуха.

описания функции) вошли данные наблюдений из следующего набора метеостанций: Алматы, Дехавз, Джизак, Ош, Пскем, Ташкент, Тянь-Шань, устье р. Терс, устье р. Тос.

Независимая проверка уравнений для расчета годового стока Амударьи и Сырдарьи, полученных для интервала 1961–1990 гг., выполнена за 1932–1960 гг. и результаты ее приведены в табл. 4.

В данном случае получение и анализ эмпирических формул типа  $Run = f(T)$  и  $Run = f(P)$  были направлены на выяснение возможности использования ожидаемых годовых значений осадков и температуры воздуха в результате колебаний климата для оценки изменений стока. Что касается расчетов годового стока в бассейнах рек Тарима, Хуанхэ, Янцзы, Инда, Ганга, Меконга, Брахмапутры, то там наряду с оценками информативно-

**Таблица 3.** Параметры формул для расчета годового стока Амударьи (А) и Сырдарьи (С). Используются базы данных: 1 – (CRU v3.1), 2 – (GPCC), 3 – (APHRODITE), 4 – (UDEL) за 1961–1990 гг.

Речной бассейн	Аргументы								
	температура воздуха			осадки			индекс баланса $I_b = I_p - I_T$		
	$R$	$\delta R$	$Cr$	$R$	$\delta R$	$Cr$	$R$	$\delta R$	$Cr$
А	0.80 (1)	0.07	0.60	0.82 (1)	0.06	0.58	0.82 (1)	0.06	0.58
	0.82 (4)			0.82 (2)					
				0.86 (3)					
А + С	0.84 (1)	0.06	0.54	0.85 (1)	0.05	0.53	0.87 (1)	0.05	0.50
	0.76 (4)			0.86 (2)					
				0.88 (3)					
С	0.80 (1)	0.07	0.60	0.84 (1)	0.06	0.54	0.85 (1)	0.05	0.52
	0.83 (4)			0.84 (2)					
				0.86 (3)					

Условные обозначения – в примечании к таблице 2. Номера в скобках соответствуют названиям баз данных в заголовке таблицы. CRU v3.1 – база данных отдела климатических исследований в Британском Центре атмосферных данных <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru>, GPCC – глобальный центр данных по осадкам, Германия <http://www.dwd.de/bvbw/>, APHRODITE – база данных по осадкам Института природы и человека, Япония <http://www.chikyu.ac.jp/precip/index.html>, UDEL – база данных Делавэрского Университета, США <http://climate.geog.udel.edu/>.

**Таблица 4.** Контроль формул для расчета годового стока Амударьи (А) и Сырдарьи (С) в обучающей (1961–1990 гг.) и независимой выборках (1932–1960 гг.)

Речной бассейн	Предикторы (в каждом случае использованы уравнения с тремя аргументами). Средняя разность между измеренным и рассчитанным стоком выражена в %					
	температура воздуха		осадки		индекс баланса	
	1961–1990	1932–1960	1961–1990	1932–1960	1961–1990	1932–1960
А	5.4	28.9	5.1	6.6	4.2	15.8
С	9.0	21.6	7.6	11.4	7.1	22.7
А+С	8.2	31.2	7.2	10.0	6.4	16.8

сти осадков и температуры воздуха были получены также уравнения регрессии третьего порядка вида  $Run = f(P, T)$ . Сводные итоги решения задачи для перечисленных выше речных бассейнов представлены в табл. 5–6.

**Региональные расчеты гидрологического режима оледенения.** Объем талого стока с площади оледенения, расположенного в основных речных бассейнах Азиатского материка, составляет существенную часть летнего стока рек Инд, Ганг, Брахмапутра, Тарим, Амударья, Сырдарья, Или. В отличие от традиционных исследований удельных величин компонентов теплового и водно-ледового баланса [7, 8, 11–13], задачей нашей работы служит независимая оценка суммарных для всего водосбора объемов осадков, испарения, ледникового стока и динамических запасов воды и сравнение результатов расчета с измеренным общим стоком на замыкающем гидростворе. Расчет составляющих водного баланса совокуп-

ностей ледников следует рассматривать как один из этапов в многоступенчатой системе описания и прогноза многолетнего режима стока рек снегово-ледникового типа питания. С целью оптимизации методики расчетов режима оледенения, в составе генеральных совокупностей ледников в бассейнах притоков рек Амударья, Сырдарья, Инд, Ганг, Брахмапутра и Тарим были выделены 3815 однородных групп объектов. В качестве классификационных критериев последовательно использованы 8 градаций ориентации ледников и 23 градации их площади. Для каждой группы определены средние и средние взвешенные по площади морфометрические характеристики ледников, которые служат входной информацией для региональных расчетов ледникового стока. В процессе генерализации и компьютерной классификации совокупностей ледников в речных бассейнах использованы данные 53 225 ледников общей площадью 81144.5 км<sup>2</sup> на территории Вы-

**Таблица 5.** Параметры зависимостей для расчета годового стока в бассейнах Ганга, Инда, Лхасы, Меконга, Хуанхэ, Янцзы

Река	Годовой сток как функция						Тип предиктора в формулах $Run = f(P, T)$ и его порядковый номер		
	осадков $P$ , ( $N_{мст} = 148$ )		температуры воздуха, $T$ ( $N_{мст} = 68$ )		$P$ и $T$ ( $N_{мст} = 128$ )				
	$r$	$dY$	$r$	$dY$	$r$	$dY$			
Лхаса	0.89	8.2	0.73	12.0	0.89	8.2	$P 18$	$P 30$	$P 34$
Ганг	0.76	10.2	0.72	11.3	0.77	10.2	$P 6$	$P 26$	$P 36$
Инд	0.74	7.2	0.65	7.7	0.82	6.1	$P 34$	$P 39$	$T 65$
Меконг /1/	0.74	8.3	0.77	7.4	0.81	6.5	$P 24$	$T 55$	$T 75$
Меконг /2/	0.77	7.6	0.71	8.8	0.79	7.7	$P 5$	$P 12$	$T 47$
Меконг /3/	0.75	8.1	0.74	8.1	0.80	7.0	$P 24$	$P 55$	$T 75$
Меконг /4/	0.77	7.5	0.70	7.4	0.78	6.9	$P 17$	$P 40$	$P 55$
Хуанхэ /1/	0.86	13.9	0.81	16.0	0.92	10.3	$P 12$	$T 44$	$T 91$
Хуанхэ /2/	0.89	12.1	0.79	16.1	0.93	9.1	$P 12$	$T 44$	$T 91$
Янцзы /1/	0.81	6.4	0.76	7.0	0.81	6.4	$P 2$	$P 15$	$P 16$
Янцзы /2/	0.79	5.3	0.66	6.0	0.79	5.2	$P 15$	$P 35$	$T 88$
Янцзы /3/	0.78	4.9	0.67	5.6	0.82	4.0	$P 12$	$T 66$	$T 84$
Янцзы /4/	0.89	6.5	0.69	9.9	0.89	5.8	$P 6$	$P 37$	$T 104$

**Таблица 6.** Параметры зависимостей для расчета годового стока в бассейне Тарима

Река	Годовой сток как функция						Тип предиктора в формулах $Run = f(P, T)$ и его порядковый номер		
	осадков, $P$ ( $N_{мст} = 148$ )		температуры воздуха, $T$ ( $N_{мст} = 68$ )		$P$ и $T$ ( $N_{мст} = 128$ )				
	$r$	$dY$	$R$	$dY$	$r$	$dY$			
Хотан	0.83	8.8	0.72	11.3	0.84	8.8	$P 7$	$P 15$	$T 37$
Аксу	0.78	4.8	0.62	4.5	0.78	4.8	$P 3$	$P 11$	$P 15$
Тошкан	0.72	8.6	0.70	9.3	0.74	8.6	$P 1$	$P 5$	$P 6$
Яркенд	0.86	7.2	0.74	9.4	0.87	6.4	$P 7$	$P 14$	$T 66$
Юрункаш	0.80	10.2	0.72	12.5	0.81	9.9	$P 7$	$P 15$	$T 37$
Тарим 5 рек	0.85	11.1	0.74	5.6	0.85	4.6	$P 1$	$P 7$	$P 15$

В таблицах 5–6:  $r$  – коэффициент корреляции стока с соответствующим аргументом,  $dY$  – абсолютная средняя относительная ошибка расчета годового стока в %.

сокой Азии. Результаты этой работы представлены в табл. 7.

**Модель ледникового стока.** Методической основой расчета стока с площади оледенения служит уравнение годового водного баланса речного бассейна в виде:

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

где  $R$  – сток в км<sup>3</sup>,  $P$  – осадки,  $W_{gl}$  – таяние многолетних запасов льда и фирна,  $E$  – испарение,  $\Delta W$  – динамические запасы воды в бассейне,

$K_R$  – коэффициент трансформации в сток объема воды, поступившей на поверхность бассейна. В уравнении (1) многолетний ряд объемов стока  $R$  – непосредственно измеряемая характеристика, а для определения других составляющих будем применять различные методы расчета. Годовой баланс аккумуляции и абляции снега на поверхности речного бассейна включает следующие компоненты:

$$Ws - Es - \Delta Ws - Wms = 0. \quad (2)$$

**Таблица 7.** Параметры оледенения Центральной и Высокой Азии

Регион	Речной бассейн	<i>Ngl</i>	<i>Fgl</i> , км <sup>2</sup>	<i>Ngr</i>
Азия	Вахш (4 бассейна)	2012	3361	500
	Зеравшан	892	687	117
	Пяндж (10 бассейнов)	3970	3848	159
	Сырдарья	3429	2522	148
Бутан	притоки Ганга	677	1314	146
Индия	притоки Инда (4 бассейна)	2182	3913	477
Китай	бассейны Восточной Азии	11 795	21767	178
	бассейны Центральной Азии	2385	2048	142
	Кара Иртыш	403	289	90
	Меконг	380	316	101
	притоки Ганга	13 006	18 100	173
	притоки Инда	2032	1451	134
	Салуин	2021	1730	145
	Тибет	536	5230	96
	Хуанхэ	121	123	56
	Янцзы	1324	1893	148
Непал	притоки Ганга	3252	5323	435
Пакистан	притоки Инда (6 бассейнов)	2808	7223	570
	Итого	53 225	81 145	3815

*Ngl* и *Fgl* – число и площадь ледников по данным Глобального Каталога WGMS [2, 26] от 06.10.2009, *Ngr* – число однородных групп ледников, рассчитанных по методу [3].

Здесь *Es* – испарение,  $\Delta Ws$  – неизрасходованный на таяние остаток годового объема аккумуляции снега, *Ws*, *Wms* – годовой сток воды вследствие таяния снега. Это уравнение выполняется для любого типа поверхности водосбора, включая ледники. При этом ледники в том же году продуцируют определенный объем воды в результате таяния многолетнего льда и фирна. Именно этот объем и есть ледниковый сток, который не связан с годовым балансом аккумуляции и таяния твердых осадков на поверхности речного бассейна. В случае ледниково-снегового питания реки общий приток воды (*Wt*) на поверхность бассейна включает следующие компоненты:

$$Wt = (Wms + Wgl) - Egl, \quad \text{где } Wgl = Wmi + Wmf.$$

Здесь *Wgl* – ледниковый сток, *Egl* – испарение с поверхности многолетнего льда и фирна, *Wmi* – объем таяния льда, *Wmf* – объем таяния фирна.

Учитывая линейный характер связи между слоем таяния и высотой над уровнем моря [5], запишем в общем виде уравнения для определения годовых/сезонных объемов ледникового стока, который формируется в областях абляции *V(Ab)* и аккумуляции *V(Ac)* в интервалах высоты:  $Z_e \div Z_{uml}$ ,  $Z_{uml} \div Z_{max}$  и  $Z_{max} \div Z_b$ . Здесь *Z<sub>e</sub>* и *Z<sub>b</sub>* – соответственно высоты конца и начала ледника, *Z<sub>max</sub>* – максимальная высота границы сезонного снега на леднике, *Z<sub>uml</sub>* – верхний уровень распространения сплошного моренного покрова. В среднем за многолетний интервал времени *Z<sub>max</sub>* соответствует высоте фирновой границы *Z<sub>fg</sub>*. В зависимости от значения баланса аккумуляции и абляции в конкретном году высота *Z<sub>max</sub>* может быть как ниже, так и выше *Z<sub>fg</sub>*.

$$V(Ab) = [M_1(\tilde{Z}_{mor}) \cdot F(mor) + M_2(\tilde{Z}_{ice}) \cdot F(ice)] \cdot K_R(Ab) \quad (3)$$

$$V(Ac) = M(\tilde{Z}_{AC}) \cdot F(Ac) \cdot K_R(Ac). \quad (4)$$

В формулах (3–4)  $M_1(\tilde{Z}_{mor})$ ,  $M_2(\tilde{Z}_{ice})$  и  $M(\tilde{Z}_{Ac})$  – соответственно, слои таяния на средних взвешенных высотах для площади сплошной морены  $F(mor)$ , открытого льда  $F(ice)$  и области аккумуляции  $F(Ac)$ ;  $KR(Ab)$  и  $KR(Ac)$  – коэффициенты стока из областей абляции и аккумуляции,  $F(Ab) = F(mor) + F(ice)$  и  $F(Ac)$  – соответственно, площади областей абляции и аккумуляции. Метод определения  $M_1(\tilde{Z}_{mor})$  детально описан в работах [5, 20]. Для расчета интенсивности таяния  $M(h_c)$  под моренным покровом толщиной  $h_c$  использована формула  $M(h_c) = f(h_c) \cdot M$ , где  $f(h_c)$  – безразмерная функция, имеющая в интервале  $0 < h_c < 2$  см максимум и две характерные точки, в которых  $f(h_c) = 1$ ,  $M$  – интенсивность таяния открытого льда.

Практические расчеты  $M(h_c)$  упрощаются путем применения выражения (5) для морены толщиной от 0 до 2 см

$$f(h_c)_1 = 0.149 h_c^3 - 0.564 h_c^2 + 0.431 h_c + 0.999 \quad (5)$$

$$\text{и} \quad f(h_c)_2 = 1.497 h_c^{-0.623} \quad (6)$$

при толщине  $h_c > 2$  см.

Учитывая различные условия стока из областей аккумуляции и абляции, расчет объемов поступления талой воды с площади оледенения выполняется отдельно для высотных интервалов  $Z_e \div Z_{fg}$  и  $Z_{fg} \div Z_b$ . При этом принято, что из интервала  $Z_e \div Z_{fg}$  вся вода попадает в русло реки, а в интервале  $Z_{fg} \div Z_b$  часть объема таяния расходуется на внутреннее питание ледников. Для расчета объема поступления в целом для интервала высот  $Z_e \div Z_b$  используется выражение (7) из работы [5]

$$Wgl = V(Ab) + (V(Ac) - \bar{V}(Ab))/3.5. \quad (7)$$

Из формул (2–3) следует, что опорными точками на ледниках для расчета объемов таяния льда под мореной, открытого льда, старого фирна и летнего снега служат высоты  $Z_e$ ,  $Z_{uml}$ ,  $Z_{fg}$ ,  $Z_{max}$ ,  $Z_b$  и средние взвешенные высоты для интервалов  $Z_e \div Z_{uml}$ ,  $Z_{uml} \div Z_{max}$ ,  $Z_{uml} \div Z_{fg}$ ,  $Z_e \div Z_{fg}$ ,  $Z_{fg} \div Z_{max}$  и  $Z_{max} \div Z_b$ . Все высоты, за исключением  $Z_{max}$  и средних взвешенных, на момент каталогизации оледенения можно найти в справочниках [2, 23, 26].

Расчет составляющих притока воды по формулам (3–4) включает применение метода регионализации параметров оледенения [3], когда отдельные ледники объединяются в характерные группы по принципу однородности значений ориентации и общей площади. Наибольшего эффекта метод регионализации достигает в крупных реч-

ных бассейнах, как, например, Амударья, Инд, Ганг, Брахмапутра, Тарим, Сырдарья.

**Средняя толщина морены на леднике и ее распределение по высоте.** По результатам [5, 20] установлено, что функция распределения средней толщины морены в интервале  $Z_e \div Z_{uml}$  имеет вид:

$$\bar{h}_c(z) = H_c(Z_e) - \frac{H_c(Z_e)}{Z_{uml} - Z_e}(z - Z_e), \quad (8)$$

где  $H_c(Z_e)$  – средняя толщина морены на конце ледника.

Для расчета  $\bar{h}_c(z)$  по формуле (8) необходимы данные о  $H_c(Z_e)$ . В работах [4, 5, 20] решение этого вопроса основано на региональной зависимости  $H_c(Z_e) = f(\Omega)$ , где  $\Omega$  – отношение площадей сплошного моренного покрова и области абляции. Информация для определения  $\Omega$  содержится в Каталоге [2, 27]. В качестве численной аппроксимации зависимости  $H_c(Z_e) = f(\Omega)$  применяется [4, 5, 20] эмпирическая формула

$$H_c(Z_e) = 88 * \Omega. \quad (\text{см}) \quad (9)$$

Коэффициент корреляции для зависимости (9) равен 0.97. Вычисление среднего слоя морены в интервале высоты  $\Delta z = z - Z_e$  выполняется по формуле

$$\bar{h}_c(\Delta z) = H_c(Z_e)(\Delta Z_C - \Delta z)/\Delta Z_C, \quad (10)$$

где  $\Delta z \leq \Delta Z_C$  – заданный интервал высоты в пределах площади сплошного моренного покрова на ледниках,  $\Delta Z_C = Z_{uml} - Z_e$ .

**Расчет испарения.** Общий вид формул для определения объема испарения  $Ev$  (км<sup>3</sup>/год) в  $i$ -й группе ледников следующий:

$$Ev = e(\tilde{Z})F(ab), \quad (11)$$

$$e(\tilde{Z}) = PE(z) \cdot th[Ps(\tilde{Z})/PE(\tilde{Z})], \quad (12)$$

$$Ps(\tilde{Z}) - M(\tilde{Z}) = 0, \quad (13)$$

$$PE = 0.0018(25 + Ts(\tilde{Z})^2(100 - r(\tilde{Z}))), \quad (14)$$

$$En(\tilde{Z}) = 6.1 \cdot 10^{\left\{7.45 \cdot \frac{Ts(Z)}{[zss + Ts(Z)]}\right\}}, \quad (15)$$

$$E(\tilde{Z}) = 0.152 \cdot \tilde{Z}^2 - 3.213 \cdot \tilde{Z} + 14.34, \quad (16)$$

$$r(\tilde{Z}) = E(\tilde{Z})/En(\tilde{Z}). \quad (17)$$

Здесь  $e$  – суммарный за лето (июнь–август) слой испарения в мм,  $\tilde{Z}$  – средняя взвешенная высота в интервале  $Z_e \div Z_{max}$ ,  $F(ab)$  – площадь области абляции,  $Ts$  – средняя за лето температура воздуха,  $PE$  – наибольшая возможная величина испарения при данных условиях увлажнения,  $Ps$  – се-

**Таблица 8.** Ледниковый сток и испарение в 1961–1990 гг.

Река /гидропост/	$F_{bas}$ , км <sup>2</sup>	$W_{bas}$ , км <sup>3</sup>	$F_{gl}^*$ , км <sup>2</sup>	$F_{gl}$ , %	$W_{gl}$ , м		$E_{gl}/W_{gl}$ , %	$W_{gl}^*$ , м
					$Reg Ts$	$Loc Ts$		
Брахмапутра /Панда/	405 000	553.2	15 761	3.9	2.02	2.48	4.1	2.15
Б. и М. Нарын /устье/	9580	2.8	965	10.1	0.62	0.71	13.8	0.66
Вахш /Комсомолабад/	29 500	19.1	3802	12.9	0.84	0.88	16.8	0.78
Зеравшан /Дупули/	10 200	4.9	687	6.7	1.38	1.59	9.0	1.77
Юрункаш /Томмгузилиок/	14 575	2.5	3172	21.8	0.29	0.50	23.0	0.43
Янцзы /Пиншан/	485 099	142.1	1893	0.4	2.82	1.82	4.8	1.55

$F_{bas}$  – площадь бассейна до гидропоста,  $W_{bas}$  – средний годовой объем стока,  $F_{gl}$  – общая площадь оледенения в выделенных группах ледников,  $F_{gl}^*$  – относительная площадь оледенения,  $W_{gl}$  – слой ледникового стока в м с площади  $F_{gl}$ , рассчитанный по региональной  $Reg Ts$  и локальной  $Loc Ts$  зависимостям средней летней температуры воздуха  $Ts$  от высоты местности,  $E_{gl}/W_{gl}$  – относительная доля испарения с поверхности области абляции в ледниковом стоке,  $W_{gl}^*$  – слой ледникового стока по другим авторам [6, 23, 29].

**Таблица 9.** Вклад ледникового питания ( $W_{gl}/W_{bas}$ ) в годовой сток

Речной бассейн /гидропост/	Площадь, $F \times 10^3$ км <sup>2</sup>	Сток, км <sup>3</sup> /год	$W_{gl}/W_{bas}$ , %
Амударья /Керки/*	188	63.6	5.6
Амударья (слияние Вахша и Пянджа)*	145	53.3	6.6
Нарын /Учкурган/*	58	11.5	5.6
Нарын /Нарын/*	11	2.8	23.2
Хуанхэ /Ханькоу/**	730	43.6	0.7
Хуанхэ /Санмен/**	688	39.1	0.7
Янцзы /Датонг/**	1705	854.6	0.4
Янцзы /Ханькоу/**	1488	705.4	0.5
Янцзы /Ючан/**	1005	441.0	0.8
Янцзы /Пиншан/**	485	142.1	2.4
Брахмапутра /Панда/**	405	573.7	6.8

\* – замкнутый речной бассейн с внутренним стоком, \*\* – бассейн со стоком в океан.

зонная сумма осадков, формула (12) – известное уравнение Ольдекопа для расчета испарения,  $th$  – гиперболический тангенс, (13) – уравнение баланса аккумуляции и абляции на высоте фирновой границы, (14) – формула Романенко [28] для расчета наибольшей возможной величины испарения  $PE$  при данных условиях увлажнения (мм/месяц), (15) – формула Магнуса для расчета насыщенного парциального давления водяного пара  $E_p$  при данной температуре воздуха, (16) – региональная зависимость парциального давления водяного пара от высоты, (17) – выражение для определения относительной влажности воздуха (%).

Исследование и контроль различных методов расчета испарения показали [28], что формула Романенко позволяет получать результаты,

близкие к данным испарителя. Для вывода формулы (16) использованы наблюдения метеостанций и данные аэрозондирования атмосферы, всего 320 пунктов на территории Центральной и Высокой Азии, расположенных в интервалах: 58.33°–118.62° в. д., 30.18°–51.12° с. ш. и высоте 360–5583 м над у. м.

Результаты практического использования перечисленных выше формул, а также гляциологической и метеорологической информации приведены в табл. 8–9.

Детальные оценки составляющих уравнения (1) годового водного баланса, полученные на примере Вахша – реки снегово-ледникового типа питания, приведены в табл. 10. Среднее число дней таяния открытого льда и льда под мореной в

**Таблица 10.** Средний годовой водный баланс бассейна р. Вахш (1961–1990 гг.)

Параметры	Величина	Описание
$Pr$	26.3	объем осадков в км <sup>3</sup> на средней взвешенной высоте бас. Вахш
$Evap$	11.1	объем испарения в км <sup>3</sup> на средней взвешенной высоте бас. Вахш
$Run$	18.9	объем стока Вахша, км <sup>3</sup> (гп Комсомолабад)
$Wgl$	3.2	ледниковый сток, км <sup>3</sup>
$Wgl(mor)$	0.5	объем таяния льда под мореной, км <sup>3</sup>
$Wgl(snow)$	0.2	объем таяния летнего снега в области абляции, км <sup>3</sup>
$Egl$	0.4	объем испарения с поверхности ледника, км <sup>3</sup>
$Wgl/Run$	18.1	вклад ледникового стока (гп Комсомолабад), %
$Run(I-III)$	1.4	динамические запасы воды в бас Вахш, км <sup>3</sup>
$Run(WB)$	19.8	$Run(WB) = Pr - Evap + Wgl + Run(I-III)$ годовой сток Вахша по уравнению водного баланса, км <sup>3</sup>
$dR = [Run - Run(WB)]$	-1.0	разность вычисленного и измеренного годового стока, км <sup>3</sup>
$dR^*$	-5.1	то же в %
$Run/Pr$	0.72	коэффициент стока
$Evap/Pr$	0.42	Отношение объемов испарения и осадков в бассейне

**Таблица 11.** Изменение оледенения  $Fgl$ , ледникового стока  $Wgl$  и испарения  $Egl$  в бассейне р. Вахш.  $Ts$  – среднелетняя температура воздуха на мст Ташкент

Годы	$Fgl$	$dFgl$	$dFgl, \%$	$Wgl$	$dWgl$	$dWgl, \%$	$Egl, \text{ млн м}^3$	$Ts, \text{ }^\circ\text{C}$
	км <sup>2</sup>			млн м <sup>3</sup>				
1961–1990	3824			3512			384	26.2
2000–2020	3393	431	11.3	3198	-314	-8.9	349	26.9

течение июня–августа равно 77. В остальные дни выпадал и таял летний снег.

**Прогноз до 2020 года ледникового стока и испарения.** Рассмотрим решение этой задачи на примере бассейна р. Вахш. В качестве локального опорного пункта для пространственной экстраполяции  $Ts$  в этом бассейне использована метеостанция Гарм. Заменим этот пункт на метеостанцию Ташкент, имеющую ряд наблюдений  $Ts$  с 1875 по 2010 г., что позволяет получить 13 средних за десятилетки значений  $Ts$  (10). Представим каждое последующее значение  $T(i+1)^*$  в этой новой выборке в виде алгебраической суммы предыдущей  $T(i)$ , изменения  $T$  на предыдущем временном шаге, равном  $[T(i-1) - T(i)]/dt$  (при  $dt = 1$ -й декаде), и некоторой переменной  $U$ , характеризующей разность между ранее рассчитанной  $T(i)^*$  и фактической  $T(i)$ . Данная модель линейной экстраполяции временного ряда  $Ts$  (10) записана в виде формул:

$$T(i+1)^* = T(i) - [T(i-1) - T(i)]/dt + U, \quad (18)$$

$$U = T(i)^* - T(i). \quad (19)$$

Коэффициент корреляции между фактическим и смоделированным рядами  $Ts$  (10) оказался рав-

ным 0.73. Установлено, что член  $U$  в формуле (18), характеризующий остаток временного ряда после вычета детерминированной составляющей  $Ts(i+1) = T(i) - [T(i-1) - T(i)]/dt$ , существенно улучшает качество экстраполяции ряда  $Ts$  (10). Применение формул (18–19) позволило рассчитать для метеостанции Ташкент средние значения  $Ts$  за 2006–2015 гг. и 2016–2025 гг. Использование данных по метеостанции Ташкент обусловлено ее наивысшим рейтингом при описании регионального поля аномалий осадков и температуры воздуха в Центральной Азии. Репрезентативность этого выбора подтверждается также результатами перерасчета объема  $Wgl$  в бассейне Вахша, который почти не отличается от приведенного в табл. 10. Оценка площади оледенения в бассейне р. Вахш, ожидаемой к 2020 году, выполнена [21] путем линейной экстраполяции изменений размеров ледников в этом бассейне за отдельные части интервала времени 1961–2000 гг. Окончательные результаты прогноза средней летней температуры воздуха на метеостанции Ташкент, площади оледенения в бассейне р. Вахш и ледникового стока содержатся в табл. 11.

Перспективы дальнейшего применения изложенного метода прогноза ледникового стока

обусловлены: а) наличием ряда измерений температуры воздуха (не менее 100 лет) на локальной опорной метеостанции или заменяющего ее пункта наблюдений, б) оценками изменений площади оледенения в рассматриваемом речном бассейне, по крайней мере, для трех–четырёх временных срезов в течение предшествующего сорокалетнего интервала.

**Результаты и выводы.** 1. В целом годовые значения осадков и температуры воздуха являются информативными переменными для получения линейных уравнений  $Run = f(T)$ ,  $Run = f(P)$  и  $Run = f(Ib)$ , обеспечивающих приемлемое качество расчетов годового стока Амударьи и Сырдарьи.

2. Оба варианта данных по осадкам (т.е. измеренных на метеостанциях и рассчитанных в узлах сетки) оказались лучшими предикторами, чем температура воздуха. Уравнения  $Run = f(P)$  также показывают лучшие результаты при проверке на независимых данных (табл. 8).

3. Набор предикторов, выбранных для правой части уравнений  $Run = f(T)$ ,  $Run = f(P)$  и  $Run = f(Ib)$ , как правило, включает одни и те же пункты измерений, что подтверждает надежность статистических связей.

4. Результаты применения индекса баланса в качестве предиктора характеризуют его более высокую информативность и эффективность, в сравнении с температурой воздуха и осадками по отдельности.

5. Уравнения  $Run = f(T)$ , полученные по данным в узлах регулярной сетки с разрешением  $0.5^\circ$  по широте и долготе, могут быть использованы совместно с другими подходами для долгосрочных прогнозов годового стока Амударьи, Сырдарьи и Амударьи + Сырдарьи, когда будущие значения предикторов определяются с помощью моделей общей циркуляции атмосферы. Этот вывод не относится к бассейнам рек Тарима, Хуанхэ, Янцзы, Инда, Ганга, Меконга, Брахмапутры.

6. Разработан и реализован пригодный для континентального оледенения Евразии простой и статистически обоснованный метод расчета объемов ледникового стока и испарения на площади области абляции и всего оледенения. Впервые разработана методика прогноза ледникового стока с заблаговременностью 10–20 лет.

7. Сравнение результатов определения  $Wgl$  с данными других авторов показывает хорошую их близость при использовании локальных данных по средней летней температуре воздуха (табл. 8). При этом в половине случаев расчет  $Wgl$  по ре-

гиональной формуле отличается от сравниваемых результатов менее чем на 10%. Доля испарения относительно ледникового стока изменяется в широких пределах и, когда она достигает 10–15% и более, ее необходимо учитывать при анализе баланса массы оледенения.

8. Используемые в работе методы расчета годовых объемов ледникового питания рек и испарения являются достаточно надежными и пригодными для других бассейнов Центральной Азии со сходным типом формирования стока, так как эти методы обеспечивают качество расчетов стока, сравнимое с данными его измерений.

9. Выделение характерных групп ледников повышает качество пространственной экстраполяции климатических факторов стока и обеспечивает обоснованность сравнений параметров гидрологического режима ледников в различных речных бассейнах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэроклиматические характеристики пограничного слоя атмосферы Средней Азии. Кн.1. Статистические характеристики метеорологических элементов в различные часы суток. Ташкент: САРНИГ-МИ, 1986. 317 с.
2. Каталог ледников СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1971–1978. Т. 14. Вып. 3. С. 7–12.
3. Коновалов В.Г. Изменения климата и формирование стока с ледников // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. Котляков В.М. М.: Наука, 2006. Т. 1. Разд. 5.2–5.4. 488 с.
4. Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2010. Т. 7. № 2. С. 43–54.
5. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 237 с.
6. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 287 с.
7. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 345 с.
8. Лебедева И.М. Водно-ледовый баланс и формирование ледникового стока (наблюдения, измерения, расчеты) // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. Котляков В.М. М.: Наука, 2006. Т. 1. Разд. 5.1. 488 с.
9. Новый аэроклиматический справочник по свободной атмосфере над СССР. Т. 1. Характеристики

- температуры воздуха. М.: Гидрометеиздат, 1980. Кн. 1. 150 с.; Кн. 2. 292 с.
10. Основные гидрологические характеристики и Государственный Водный Кадастр СССР. Т. 14. Вып. 1. Бассейн р. Сырдарьи. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 477 с.; 1974. 529 с.; Т. 14. Вып. 3. Бассейн р. Амударьи. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 434 с.; 1980, 443 с.
  11. *Ходаков В.Г.* Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М.: Наука, 1978. 194 с.
  12. *Черкасов П.А.* Расчет составляющих водно-ледового баланса внутриконтинентальной ледниковой системы. Алматы: Каганат, 2004. 334 с.
  13. *Anderson E.A.* Snow accumulation and ablation model // NOAA Tech. Memo. NWS Hydro-17. Silver Spring, 1973. 228 p.
  14. *Bodo B.A.* Monthly Discharge Data for World Rivers (excluding former Soviet Union). Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. V1.3. 2001. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.0/>
  15. *Bodo B.A.* Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU] Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2000. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds553.1/>.
  16. Former Soviet Union Monthly Precipitation Archive, 1891–1993. NSIDC-0059. Boulder. USA, 1998. <http://www-nsidc.colorado.edu/>.
  17. Global Historical Climatological Network Database. GHCN. Version 2. 1999. <ftp://www.ncdc.noaa.gov/>
  18. Global Runoff Data Centre. <http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/>
  19. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L. et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *Int. Journ. of Climatology*. 2005. 25. P. 1965–1978.
  20. *Konovalov V.G.* Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff. // *IAHS Publ.* № 264. 2000. P.109–118.
  21. *Konovalov V.G.* Past and Prospective Change in State of Central Asian Glaciers // *Лед и Снег*. 2011. 3(115). С. 60–68.
  22. *Mitchell T., Jones P.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. // *Int. Journ. of Climatology*. 2005. 25. P. 693–712.
  23. Concise Glacier Inventory of China. Shi Yafeng / ed. Shanghai Popular Science Press, 2008. 205 p.
  24. *Tao Shiyun, Congbin Fu, Zhaomei Zeng, Qingyun Zhang.* Two long-term instrumental climatic data bases of the People's Republic of China // ORNL/CDIAC-47, NDP-039. Oak Ridge. Tennessee, 1991.
  25. *Williams M.W., Konovalov V.G.* Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. [http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174\\_central\\_asia\\_data/](http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/)
  26. World Glaciers Inventory. 2009. [http://nsidc.org/data/glacier\\_inventory/](http://nsidc.org/data/glacier_inventory/). <ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G01130>
  27. World Water Resources at the Beginning of the 21st Century / *Shiklomanov I.A., John Rodda.* Cambridge. Univ Press, 2003. 435 p.
  28. *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.
  29. *Zhang Qiang, Xu Chong-Yu, Tao Hui, Jiang Tao, Chen Yongqin David.* Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: a case study of the Tarim River basin, China // *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2009. DOI 10.1007/s00477-009-0324-0.

## REFERENCES

1. *Aeroklimaticheskie kharakteristiki pogranichnogo sloya atmosfery Srednei Azii. Kniga 1: Statisticheskie kharakteristiki meteorologicheskikh elementov v razlichnye chasy sutok* (Aeroclimatic Characteristics of Boundary Atmospheric Level of Central Asia, Book 1: Statistical Parameters of Meteorological Elements in Different Hours of a Day). Tashkent: Sredneaziat. Reg. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst., 1986. 317 p.
2. *Katalog lednikov SSSR* (Catalogue of the Glaciers of the Soviet Union). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1971–1978, vol. 14, no. 3, parts 7–12.
3. *Konovalov V.G.* Climate changes and formation of the runoffs from the glaciers, in *Olednenie Severnoi i Tsentral'noi Evrazii v sovremennuyu epokhu* (Modern Glaciation of Northern and Central Eurasia), *Kotlyakov V.M.*, Ed. Moscow: Nauka Publ., 2006. vol. 1, chaps. 5.2–5.4. (In Russ.).
4. *Konovalov V.G.* Inventory of mountainous glaciers and their distribution determined using remote sensing. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2010, vol. 7, no. 2, pp. 43–54. (In Russ.).
5. *Konovalov V.G.* *Tayanie i stok s lednikov v basseinakh rek Srednei Azii* (Melting and Runoff from Glaciers in the River Basins of Central Asia). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1985. 237 p.
6. *Krenke A.N.* *Massoobmen v lednikovyx sistemakh na territorii SSSR* (Mass Exchange in the Glacial Systems in the Soviet Union). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982. 287 p.
7. *Kuz'min P.P.* *Protsess tayaniya snezhnogo pokrova* (Melting of Snow Cover). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1961. 345 p.

8. Lebedeva I.M. Water-ice balance and formation of glacial runoff: observations, measurements, and calculations, in *Oledeneniye Severnoi i Tsentral'noi Evrazii v sovremennuyu epokhu* (Modern Glaciation of Northern and Central Eurasia), Kotlyakov V.M., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2006. vol. 1, chap. 5.1. (In Russ.).
9. *Novyi aeroklimaticheskii sparvochnik po svobodnoi atmosfere nad SSSR. Tom 1: Kharakteristiki temperaturny vozdukh* (New Aeroclimatic Handbook on Free Atmosphere over Soviet Union, Vol. 1: Characteristics of the Air Temperature). Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1980, book 1. 150 p.; book 2. 292 p.
10. *Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki i Gosudarstvennyi Vodnyi Kadastr SSSR. Tom. 14, No. 1: Bassein r. Syrdar'i* (General Hydrological Characteristics and State Water Inventory of the Soviet Union, Vol. 14, No. 1: The Basin of Syrdarya River). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967. 477 p.; 1974. 529 p.; *Tom 14, No. 3: Bassein r. Amudar'i* (Vol. 14, No. 3: The Basin of Amudarya River). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1976. 434 p.; 1980. 443 p.
11. Khodakov V.G. *Vodno-lednikovyi balans raionov sovremennogo i drevnego oledeneniya SSSR* (Water-Ice Balance of the Regions of modern and Ancient Glaciation in the Soviet Union). Moscow: Nauka Publ., 1978. 194 p.
12. Cherkasov P.A. *Raschet sostavlyayushchikh vodnoledovogo balansa vnutrikontinental'noi lednikovoi sistemy* (Calculation of the Indices of Water-Ice Balance of Intracontinental Glacial System). Alma-Ata: Kaganat Publ., 2004. 334 p.
13. Anderson E.A. Snow accumulation and ablation model, in *NOAA Tech. Memo. NWS Hydro-17*. Silver Spring, 1973. 228 p.
14. Bodo B.A. Monthly discharge data for World rivers (excluding former Soviet Union), in *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Ver. 1.3*, 2001. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.0/>
15. Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union (FSU), in *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*, 2000. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds553.1/>
16. *Former Soviet Union Monthly Precipitation Archive, 1891–1993, NSIDC-0059*. Boulder, USA, 1998. <http://www-nsidc.colorado.edu/>
17. Global Historical Climatological Network Database, GHCN, ver. 2, 1999. <ftp://www.ncdc.noaa.gov/>
18. Global Runoff Data Centre. <http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/>
19. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., and Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2005. 25, pp. 1965–1978.
20. Konovalov V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff, in *IAHS Publication No. 264*, 2000, pp. 109–118.
21. Konovalov V.G. Past and prospective change in state of Central Asian glaciers. *Led Sneg*, 2011. 3(115), pp. 60–68. (In Russ.).
22. Mitchell T. and Jones P. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 2005. 25, pp. 693–712.
23. *Concise Glacier Inventory of China*, Yafeng S., Ed., Shanghai: Popular Sci. Press, 2008. 205 p.
24. Shiyan T., Fu C., Zeng Z., and Zhang Q. Two long-term instrumental climatic data bases of the People's Republic of China, in *ORNL/CDIAC-47, NDP-039*. Oak Ridge, Tennessee, 1991.
25. Williams M.W. and Konovalov V.G. *Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879-2003*. Boulder, Colorado: USA Natl. Snow Ice Data Center, 2008. [http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174\\_central\\_asia\\_data/](http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/).
26. World Glaciers Inventory, 2009. [http://nsidc.org/data/glacier\\_inventory/](http://nsidc.org/data/glacier_inventory/). <ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G01130>.
27. *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*, Shiklomanov I.A. and Rodda J., Eds. Cambridge Univ. Press, 2003. 435 p.
28. Xu C.-Y., and Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrol. Processes*, 1998, vol. 12, pp. 429–442.
29. Zhang Q., Xu C.-Y., Tao H., Jiang T., and Chen Y.D. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: a case study of the Tarim River basin, China. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2009. doi: 10.1007/s00477-009-0324-0

## Estimation and Forecast of Components of Runoff in the River Basins of Central Asia

V.G. Konovalov

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; vladgeo-exp@yandex.ru*

Various options for method of the over long-term hydrological forecasts of annual runoff for several river basins in Central Asia (Amu Darya, Syr Darya, Tarim, Ganges, Indus, Mekong, Brahmaputra, Yangtze, Huang He) are investigated. Annual air temperature, precipitation, and normalized difference of anomalies of these variables according to data of meteorostations and for gridded values having 0.5 degree increments in latitude and longitude were tested as inputs. Informative capability of each predictor for calculating runoff in river basins of Central Asia was described. Expected air temperature as a predictor for long-term forecasts of river runoff was obtained by extrapolating the proper temporal series. Simulation, calculation and forecast of glacial runoff and evaporation were performed in the ablation zone of Central Asia glaciers. The input data for the model are: precipitation, average temperature and humidity during the summer, generalized areal, altitudinal and morphological parameters of the glaciation. In order to optimize the method of calculating of regime of glaciation, the populations of glaciers in the basins of the tributaries of the Amu Darya, Syr Darya, Indus, Ganges, Yellow, Yangtze, Brahmaputra and Tarim rivers were allocated to 3815 homogeneous groups of objects. Eight values of altitude and 23 gradations of glacier area are consistently applied as classification criteria. For each group the average and weighted average morphometric characteristics of glaciers were determined. Data from 53 225 glaciers with a total area of 81144 km<sup>2</sup> in the basins of Central Asia are used to demonstrate the capabilities of the method. Modelled values of water balance components (runoff, precipitation, and evaporation) were obtained for river basins of Vakhsh, Panj, Zarafshan, Naryn, Brahmaputra.

**Key words:** Central Asia, annual and glacial runoff, estimation and prediction, regression equations, model of glacial runoff.