

УДК 556.532.226.16

**ЗОНАЛЬНЫЕ МОДУЛИ СТОКА И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ БАССЕЙНА
РЕКИ КАШКАДАРЬИ**Доктор геогр. наук. Г.Е. Глазырин
Н.Ю. Страхова

Предлагается модифицированная методика расчета зональных модулей стока, входной информацией для которой являются средние многолетние модули стока рек и распределение площадей бассейнов по высотным зонам. Методика позволила рассчитать водные ресурсы области питания бассейна р. Кашкадарьи – района интенсивного земледелия. Она, несомненно, применима и для других горных районов.

Водные ресурсы являются основой всей жизни в Узбекистане. Это относится и к обширной, с теплым климатом, но маловодной долине р. Кашкадарье, лежащей между западными отрогами Зеравшанского и Гиссарского хребтов. Достаточно подробное описание природных условий долины приведены в ряде работ, в частности, в [6]. Основным занятием населения является сельское хозяйство. Лимитирующим фактором для его дальнейшего развития является вода, так как сток текущих в долину рек почти полностью расходуется на орошение. Именно поэтому необходимо, во-первых, время от времени пересматривать сведения о водных ресурсах на основе свежей гидрологической информации, во-вторых, разрабатывать новые методы их расчета. Последней хорошей публикацией, посвященной оценке водных ресурсов Кашкадарьи, является статья Ю.Н. Иванова [5].

В нашей работе предлагается новый подход к расчету распределения стока по высоте и рассчитаны водные ресурсы бассейна р. Кашкадарьи на основе свежей гидрологической информации.

Для оценки суммарных водных ресурсов некоторого района, а также построения карт стока необходимо, как известно, знать распределение модуля стока по всей его территории, включая самые верхние зоны [2, 9]. Учитывая, что в горных районах Средней Азии основным географическим фактором, влияющим на большинство природных процессов, в том числе – и на речной сток, является высота местности, общепринятой стала методика расчета стока в зависимости только от высоты. При наличии достаточно густой

сети гидрологических станций и постов обычно строится зависимость средних модулей стока бассейнов M от их средней высоты Hb для отдельных, так называемых «однородных» районов, в которых изменение модуля стока с высотой принимается одинаковым. Так, в частности, сделано и в работе [5]. Однако на этих зависимостях верхние и нижние зоны бассейнов оказываются далеко от области средних высот водосборов.

На трудность и необъективность экстраполяции таких кривых вверх и вниз обратил внимание М.Н. Большаков, и чтобы обойти их, предложил в 1950 году понятие «зональных модулей стока» [2]. Эти модули позволяют, во-первых, без значительной экстраполяции вычислять средние модули стока неизученных рек, во-вторых, строить карты территориального распределения стока для горных районов, в-третьих, помогают оценить изменение с высотой элементов водного баланса.

Можно выделить две группы методов расчета зональных модулей. Первая – расчет модулей по составляющим водного баланса на разных высотах в бассейнах [3, 8, 10]. Такой подход, конечно, понятен и логически обоснован, но, как правило, для его реализации нет необходимой информации.

Более перспективным оказался формальный подход, исходной информацией для которого, что очень важно, являются лишь данные о средних многолетних расходах воды рек, на которых имеются наблюдения, и распределения площадей их бассейнов по высотным зонам, которые легко получить по картам. М.Н. Большаков [2] пошел именно этим путем. Рассмотрим его методику подробнее.

Допустим, как уже было сказано, что в некотором «однородном» районе зональные модули стока m распределяются по высоте речных бассейнов одинаково. Пусть в этом районе имеется несколько бассейнов, средние модули стока M которых известны. Тогда средний многолетний сток каждой j -ой реки равен:

$$Q_j = M_j \cdot F_j = \sum_{i=1}^n m_i \cdot f_{ij},$$

где M_j – средний многолетний модуль стока с j -го бассейна; F_j – общая площадь бассейна; n – число высотных зон; f_{ij} – площадь i -ой высотной зоны в j -ом бассейне. Отсюда следует:

$$M_j = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{f_{ij}}{F_j}.$$

Разность левой и правой частей этого уравнения дает ошибку расчета средних модулей стока по зональным. Для группы из N бассейнов необходимо подобрать такие m_i , чтобы минимальной была метрика

$$\delta = \sum_{j=1}^N \left(M_j - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{f_{ij}}{F_j} \right)^2. \quad (1)$$

В этом и заключается идея М.Н. Большакова.

Очевидно, что если число бассейнов больше числа зон, то методом наименьших квадратов могут быть подобраны такие m_i , что δ окажется минимальной из всех возможных. М.Н. Большаков предложил следующий путь: на основании зависимости $M(Hb)$, наличие которой и определяет «однородность» района, подбирается «на глаз» кривая $m(H)$ так, чтобы она проходила среди точек $M(Hb)$, и рассчитывается δ . Затем делается попытка изменить кривую так, чтобы δ стала меньше. Здесь очевиден отход от объективности: кривые подбираются плавно возрастающими и проходящими среди точек зависимости $M(Hb)$.

Причина, как мы понимаем, в том, что применение формального метода наименьших квадратов, хотя и дает автоматически наименьшую сумму квадратов отклонений (1), но найденные зональные модули изменяются с высотой бессистемно, что не соответствует реальности. Похожий формальный, но более сложный метод предлагается и в работе [1].

Выход из этой ситуации, по нашему мнению, может быть таким: исходя из наших знаний о виде зависимости стока от высоты, в целом аналогичной распределению годовых сумм осадков, можно подобрать подходящую малопараметрическую зависимость $m(H)$ и затем уже каким-либо формальным методом рассчитать ее параметры.

Первая попытка такого рода была сделана в работе [4]. Предполагалось, что зависимость имеет полиномиальный вид: $m(H) = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_nH^n$. Таким образом, задача состояла в поиске параметров $a_0 - a_n$ методом наименьших квадратов. При этом оказалось, что получаемые кривые имеют довольно причудливый вид, и пришлось вводить дополнительные ограничения, в частности, назначать минимальные модули стока внизу и предполагать, что они имеют максимальные значения на некоторой высоте.

По нашему мнению, можно пойти другим путем: следует подобрать какие-то более подходящие функции с меньшим числом параметров,

но достаточно хорошо отражающие изменения природных процессов, в том числе – зональных модулей стока с высотой. Известно, что в южных горных районах Средней Азии осадки возрастают до самых гребней [7]. Очевидно, так же изменяется и модуль стока. В северных же районах существует «гребень осадков», часто находящийся на высоте фирновой границы на ледниках [2, 10]. Поэтому в качестве функций, описывающих изменение зональных модулей стока с высотой, можно взять, например, следующие:

$$m(H) = a + b \cdot \exp(H), \quad (2)$$

$$m(H) = a \cdot \exp\left(-\frac{(H - c)^2}{b}\right). \quad (3)$$

Здесь a , b и c – параметры.

Функция (2) возрастает неограниченно при $b > 0$, а формула (3) имеет максимум при $H = c$ ($a, b, c > 0$). Следовательно, она может быть использована и для тех районов, где существует «гребень осадков».

Функции (2) и (3) нелинейны, и их параметры могут быть найдены только методом последовательных приближений. Критерием качества служит, как и ранее, минимальная сумма отклонений истинных средних модулей стока рек от вычисленных (1). Эта методика и была нами использована для расчетов зональных модулей стока и общих водных ресурсов бассейна р. Кашкадарьи.

Ранее было сказано, что для расчетов требуется два вида информации: во-первых, распределение площадей бассейнов по высоте, во-вторых, средние многолетние расходы воды для возможно большего числа речных бассейнов. Площади высотных зон для ряда частных бассейнов, входящих в бассейн р. Кашкадарьи, приведены в очень полезной книге [7], для остальных были измерены по картам масштаба 1:100 000.

Сложнее ситуация с гидрологическими данными. В разное время в бассейне р. Кашкадарьи работал 51 гидрологический пост [5]. Из них лишь 25 гидропостов расположены на участках рек с ненарушенным хозяйственной деятельностью режимом стока. Следовательно, только данные этих постов и можно использовать для оценки естественных водных ресурсов бассейна. Длительность наблюдений на них, по состоянию на 2008 г., колеблется от 16 до 81 года, площади водосборов – от 24,4 до 4970 км². Средние высоты водосборов лежат в довольно широком диапазоне – от 0,94 до 3,50 км.

Прежде всего, ряды наблюдений нужно было привести к одному периоду. Для этой цели была вычислена корреляционная матрица среднегодовых расходов всех этих рек и в качестве реки-аналоги выбрана р. Кашкадарья – пост «Кишлак Варганза» с периодом наблюдений с 1928 по 2008 годы. Средние годовые расходы воды на этом посту достаточно хорошо связаны с расходами воды остальных рек, что позволило восстановить средние годовые расходы на них за период 1928...2008 гг.

Данные о восстановленном среднем многолетнем годовом стоке 25 рек и распределении площадей их бассейнов по высоте позволили рассчитать параметры в формулах (2) и (3), то есть найти распределение зональных модулей стока по высоте во всем бассейне р. Кашкадарья. Сделано это было с помощью средства «Поиск решения» в Excel. В качестве критерия сходства, как уже говорилось, использована метрика (1). Подобранные формулы оказались такими:

$$m(H) = 2,095 + 0,635 \cdot \exp(H) \quad (4)$$

и

$$m(H) = 9575 \cdot \exp\left(-\frac{(H - 18,36)^2}{36,84}\right). \quad (5)$$

Эти функции, а также истинные средние для бассейнов модули стока показаны на рисунке. Видим, что графики функций достаточно близки. Заметное расхождение имеет место лишь в нижней части кривых, при малых высотах. Результаты могут быть в дальнейшем несколько уточнены, если расчеты делать не для всего бассейна, а разбить его предварительно на районы, как это было сделано в работе [5]. Однако при этом уменьшится число постов в каждом районе и, следовательно, упадет надежность расчетов.

Необходимо отметить, что расхождение кривых в нижней части может существенно сказываться на результатах расчетов общего объема стока с бассейна, так как именно внизу площади высотных зон самые большие. К сожалению, у нас нет критерия, позволяющего отдать предпочтение той или иной из этих кривых.

Полученное распределение зональных модулей стока может быть использовано, во-первых, для расчетов стока рек, на которых отсутствуют гидрометрические измерения, во-вторых, для восстановления естественного стока тех рек, воды которых в настоящее время разбираются на орошение.

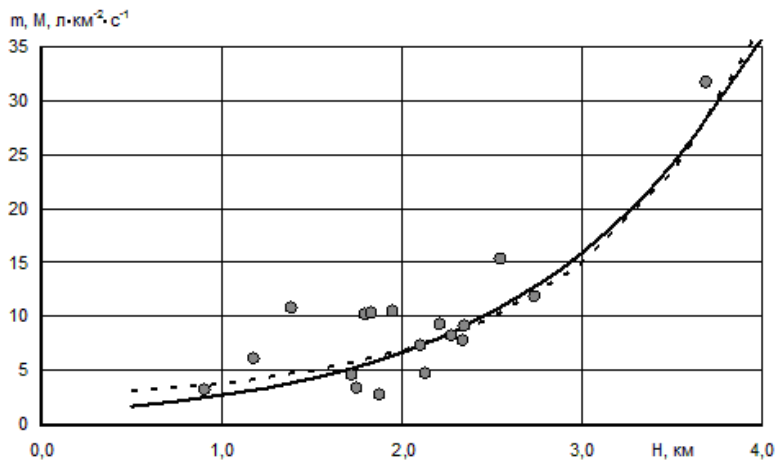


Рис. Зависимости зональных модулей стока (m) от высоты H , рассчитанные по формулам (2) – пунктир и (3) – сплошная линия. Точками показаны истинные средние для бассейнов модули стока (M).

Для расчетов общих средних многолетних ресурсов бассейна р. Кашкадарьи были определены площади высотных зон всего бассейна $f_i(H)$. Они приведены в таблице. Там же приведен расчет средних многолетних зональных (w) и суммарных водных ресурсов бассейна для его части, расположенной выше 0,4 км, выполненный с использованием формул (4) и (5). Очевидно, что суммарные ресурсы [км³/год] рассчитаны с помощью уравнения:

$$W = \frac{31,54}{10^6} \sum_{i=1}^n m_i \cdot f_i,$$

где зональные модули стока имеют размерность [л·км⁻²·с⁻¹], а площади зон – [км²].

Таблица

Расчет суммарных водных ресурсов бассейна р. Кашкадарьи

Высотная зона, км	Средняя высота, км	Площадь зоны, км ²	Формула (4)		Формула (5)	
			m , л·км ⁻² ·с ⁻¹	w , км ³ /ГОД	m , л·км ⁻² ·с ⁻¹	w , км ³ /ГОД
0,4...0,8	0,6	3838	3,25	0,394	1,83	0,222
0,8...1,2	1,0	1980	3,82	0,239	2,68	0,167
1,2...1,6	1,4	1650	4,67	0,243	3,89	0,203
1,6...2,0	1,8	1442	5,94	0,270	5,60	0,255
2,0...2,4	2,2	1159	7,83	0,286	7,99	0,292
2,4...2,8	2,6	655	10,64	0,220	11,30	0,233
2,8...3,2	3,0	321	14,85	0,150	15,84	0,160
Сумма		11045		1,802		1,533

Итак, суммарные водные ресурсы для территории бассейна, расположенного выше 0,4 км, оказались равными 1,80 км³/год при расчете по формуле (4) и 1,53 км³/год при расчете по формуле (5). Расхождение составляет 15 %. Это достаточно много, но нужно учесть, что вызвано оно различием в нижней, самой обширной зоне бассейна (0,4...0,8 км), где, на самом деле, происходит не формирование, а рассеяние стока [5]. Если же мы ограничимся частью бассейна выше 0,8 км, то получим, соответственно, 1,41 и 1,31 км³/год, разница между которыми уменьшилась до 7 %.

Интересно сопоставить найденные нами объемы стока с теми, которые были определены другими авторами. В.Л. Шульц [9] получил 1,38 км³/год, а Ю.Н. Иванов – 1,41 км³/год [5]. Эти величины практически совпадают с нашими, хотя, нужно заметить, сравнение не совсем корректно. Поскольку в работах [5, 9] и нашей, во-первых, использованы материалы разных лет наблюдений, во-вторых, приняты разные высоты, ограничивающие зону формирования стока снизу.

Итак, предлагается новая, вернее, модифицированная методика расчета зональных модулей стока, пригодная, по нашему мнению, для использования в разных горных районах. Она позволила оценить суммарные многолетние водные ресурсы горной части бассейна р. Кашкадарьи и их распределение по высоте.

Мы глубоко признательны Ю.Н. Иванову, за полезные советы, полученные от него при обсуждении наших результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Трубецкова М.Д. О высотной зональности стока рек со значительной долей ледникового питания. // Лед и Снег. – 2011. – №1(113). – С. 45-52.
2. Большаков М.Н. Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. – Фрунзе: Илим, 1974. – 308 с.
3. Владимиров Л.А. Средний годовой сток рек Грузии. – Тбилиси: Изд. АН Груз. ССР, 1962. – 117 с.
4. Глазырин Г.Е., Юнусова О.Ш. Объективизация методики расчета зональных модулей для горных районов // Гляциально-нивальные области Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим. – 1990. – С. 106-113.
5. Иванов Ю.Н. Водные ресурсы бассейна реки Кашкадарьи // Труды НИГМИ. – 2010. – Вып. 12(257). – С. 64-84.

