

## О высотной зональности стока рек со значительной долей ледникового питания

© 2011 г. М.В. Болгов, М.Д. Трубецкова

Институт водных проблем РАН, Москва

*bolgovmv@mail.ru*

*Статья принята к печати 15 июня 2010 г.*

Верхняя Амударья, зональный сток, ледниковое питание, обратные задачи, рассеивание стока, регуляризация, формирование стока.

Glacial feeding, inverse problems, regularization, runoff formation, runoff losses, Upper Amu Darya, zonal runoff.

На примере бассейна Верхней Амударьи исследованы особенности высотной зональности стока рек. Для районов, однородных по характеру зависимости стока от средневзвешенной высоты бассейна, решалась задача о зональном стоке. На основе данных о стоке в замыкающих створах определялась величина стока с разных высотных зон. Данная задача относится к некорректно поставленным обратным задачам математической физики, и для её решения использовался метод регуляризации А.Н. Тихонова. По каждому району получены значения модулей зонального стока и определены границы зон формирования и рассеивания стока. Показана возможность применения предложенного метода при расчётах стока рек для неизученных водосборов. Оценено влияние сокращения площади оледенения в горных районах на величину стока. Для двух периодов – до и после 1970 г. – в аналогичных по этому показателю районах рассчитаны средние значения модулей зонального стока за период максимальной водности и за год. После 1970 г. уменьшилась водоносность на высотах менее 4000 м, но увеличился сток с верхних частей бассейна (выше 4000 м); область максимальных значений модуля стока сместилась на большие высоты.

### Введение

Для рационального использования водных ресурсов горных регионов необходимы достаточно надёжные оценка и прогнозирование характеристик водного режима рек. Одна из важнейших особенностей гидрологического режима горных рек – зависимость речного стока и других элементов водного баланса от высоты бассейна. Детальное описание условий формирования стока можно получить на основе определения зонального стока, т.е. стока, поступающего с разных высотных диапазонов бассейна. По мнению ряда авторов [2, 3], именно значения зонального стока представляют собой наиболее информативную гидрологическую характеристику. Они позволяют устанавливать вклад каждого высотного диапазона в общий объём стока рек. Это даёт возможность обосновывать выдвинутые гипотезы об изменении составляющих водного баланса с высотой, а также определять высотную границу, ниже которой наблюдается транзит или рассеивание стока, что сложно сделать в случае применения традиционных используемых зависимостей.

В настоящей статье решается задача о зональном стоке для верхней части бассейна р. Амударья, которая включает в себя северную часть бассейна р. Пяндж (севернее границы с Афганистаном), бассейн р. Вахш и бассейны рек, стекающих с южных склонов Гиссарского хребта и его отрогов, – Кафирниган, Сурхандарья, Шерабад.

### Исследование зонального стока

В горах чётко проявляется высотная поясность климатических и гидрологических процессов. Водоносность рек может изменяться от величин, близких к нулю, в нижних частях речных бассейнов до 100 л/с на 1 км<sup>2</sup> в высокогорной зоне наиболее активного формирования стока [3]. Для описания стока горных рек обычно используется зависимость модуля среднемноголетнего стока от средней взвешенной высоты бассейна. Для рек Средней Азии зависимости модуля стока от высоты бассейна впервые были обобщены и опубликованы В.Л. Шульцем [14]. Однако большая часть гидрологических постов расположена в створах рек в среднем течении, поэтому при выходе из гор модуль стока, рассчитанный по измерениям на этих постах, характеризует лишь среднюю удельную водоносность бассейна, не отражая высотную поясность в её распределении. Здесь целесообразно использовать другой подход: рассчитывать величину стока с определённой высотной зоны. Впервые такой подход был применён М.Н. Большаковым при определении величин стока рек Тянь-Шаня [3]. Позже определение стока с разных высотных поясов было выполнено автором [2] для рек Монгольской Народной Республики.

**Постановка задачи.** М.Н. Большаков [3] ввёл понятия зонального и интегрального модуля стока и предложил метод зональных модулей для определения нормы годового стока в неизученных створах горных рек. Интегральный модуль стока  $Y$ , вычисленный для

площади бассейна  $F$  выше замыкающего створа, можно представить как сумму средних зональных модулей стока  $y$ , относящихся к высотным поясам этого бассейна и обладающих примерно одинаковой удельной водоносностью в пределах каждого пояса:

$$Y = \sum_{i=1}^n f_i y_i \quad (1)$$

где  $f_i$ ,  $y_i$  – соответственно относительная площадь и зональный сток, относящиеся к  $i$ -й высотной зоне;  $n$  – число высотных зон.

Если рассматривать горный район с однородными физико-географическими условиями (ориентация горных склонов по отношению к направлению переноса воздушных масс; доступность водосборов этим воздушным массам; ход синоптических процессов [15]), в котором можно построить зависимости среднего модуля стока от средней высоты бассейна, то можно принять, что для всех речных бассейнов внутри этого района величины зонального стока с одних и тех же высотных зон приблизительно одинаковы. Тогда для каждого водомерного поста внутри такого района можно записать уравнение (1); в результате получаем систему линейных уравнений:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^{n_1} f_{1,i} y_i; \quad Y_2 = \sum_{i=1}^{n_2} f_{2,i} y_i; \quad Y_m = \sum_{i=1}^{n_m} f_{m,i} y_i,$$

или в матричном виде

$$Y = Ay, \quad (2)$$

где  $A$  – матрица с элементами  $f_{i,j}$ ;  $j$  – номер водомерного поста;  $m$  – число водомерных постов в данном районе.

Решение системы уравнений (2) позволяет получить величины зональных модулей стока в однородном гидрологическом районе. Таким образом, можно сформулировать следующую обратную задачу: на основе среднесезонных величин стока (годового или сезонного) в замыкающих створах необходимо определить значения зональных модулей стока для различных высотных диапазонов.

**Метод регуляризации.** В силу ряда причин, обсуждаемых далее, система (2) относится к определённым классу задач математической физики, а именно: к некорректно поставленным обратным задачам [12]. Это означает, что решение системы (2) может быть не единственным и даже небольшие изменения исходных данных могут значительно изменить решение, т.е. оно неустойчиво. Точное решение найти невозможно или оно не имеет смысла. Для нахождения приближённого решения применялся метод регуляризации А.Н. Тихонова [12] для решения некорректно поставленных задач, основанный на привлечении дополнительной априорной информации о решении. В гидрологии теория некорректно поставленных задач использовалась в ряде работ, см. например [7, 17, 18] и др.

Решение системы линейных алгебраических уравнений  $Ay = Y$  методом регуляризации А.Н. Тихо-

нова сводится к минимизации параметрического функционала

$$\|Ay - Y\|^2 + \alpha \|y\|^2, \quad (3)$$

где  $\alpha > 0$  – параметр регуляризации.

Значение параметра регуляризации  $\alpha$  определяется по принципу невязки из условия  $\rho(\alpha) = \delta \|Y\|$ , где  $\rho(\alpha)$  – невязка на регуляризованном решении,  $\delta$  – заданный относительный уровень ошибки правой части уравнения (1),  $\|Y\|$  – евклидова норма правой части уравнения (1). Для получения численного решения (3) использовался алгоритм, основанный на сведении данной задачи к более простой «канонической» задаче с двухдиагональной матрицей  $A$  согласно методу В.В. Воеводина [5] и методике касательных И. Ньютона в соответствии с вычислительной схемой В.А. Морозова [8].

Относительный уровень невязки  $\delta$  характеризует погрешности определения значений среднего многолетнего модуля стока. Первоначально его величина принималась равной 0,05. Затем в процессе решения обратной задачи, если устойчивого решения не удавалось достигнуть, она увеличивалась. В качестве критерия устойчивости искомого решения принималась качественная оценка его поведения (отсутствие скачкообразных, хаотических изменений стока с высотой, стабилизация решения с ростом параметра регуляризации).

Отметим, что неустойчивость решения обратной задачи возникает по ряду причин. Во-первых, линейная модель (1) – некоторое приближение, степень адекватности которого не всегда известна. Во-вторых, данные наблюдений всегда приближены и имеют погрешность; соответственно с ошибкой оцениваются и средние значения (нормы). В-третьих, принятие условия равенства зонального стока для всех рек однородных гидрологических районов также есть некоторое приближение. В целом, наличие ошибок и обуславливает необходимость применения метода решения системы уравнений (2), обеспечивающего устойчивость искомой зависимости.

Собственно условие устойчивости искомой зависимости и формулируется в виде так называемой «стабилизирующей добавки» (вторая часть уравнения (3)). Основной вопрос метода регуляризации – насколько можно позволить себе уклониться от решения исходной задачи, пытаясь добиться устойчивости приближённого решения. По нашему мнению, значение параметра регуляризации около 0,1 (10%) отражает суммарное влияние перечисленных выше факторов неопределённости (неадекватности) и может быть принято в качестве допустимого.

**Решение задачи о зональном стоке.** Районирование бассейна Верхней Амударьи по принципу зависимости стока от средней взвешенной высоты бассейна  $Y = F(H_{cp})$  неоднократно проводилось разными авторами [9, 11, 15, 16]. Мы попытались уточнить

границы однородных районов на основе решения задачи о зональном стоке. Районирование проводилось в два этапа.

На первом этапе районы выделялись на основе классического подхода, использованного ранее в работах [8, 11, 15, 16], т.е. путём анализа зависимости стока от средней взвешенной высоты бассейна  $Y = F(H_{cp})$ , с учётом более продолжительных рядов наблюдений. На втором этапе для каждого полученного района по имеющимся данным наблюдений решалась задача о зональном стоке и определялись величины зональных модулей стока. Затем для каждого поста находилась интегральный модуль стока в соответствии с полученными величинами зональных модулей. Посты, для которых рассчитанные таким образом значения существенно отличались от измеренных, исключались из данного района и при возможности переносились в соседние. Таким образом, границы районов уточнялись и обратная задача решалась вновь, для нового набора постов внутри каждого района.

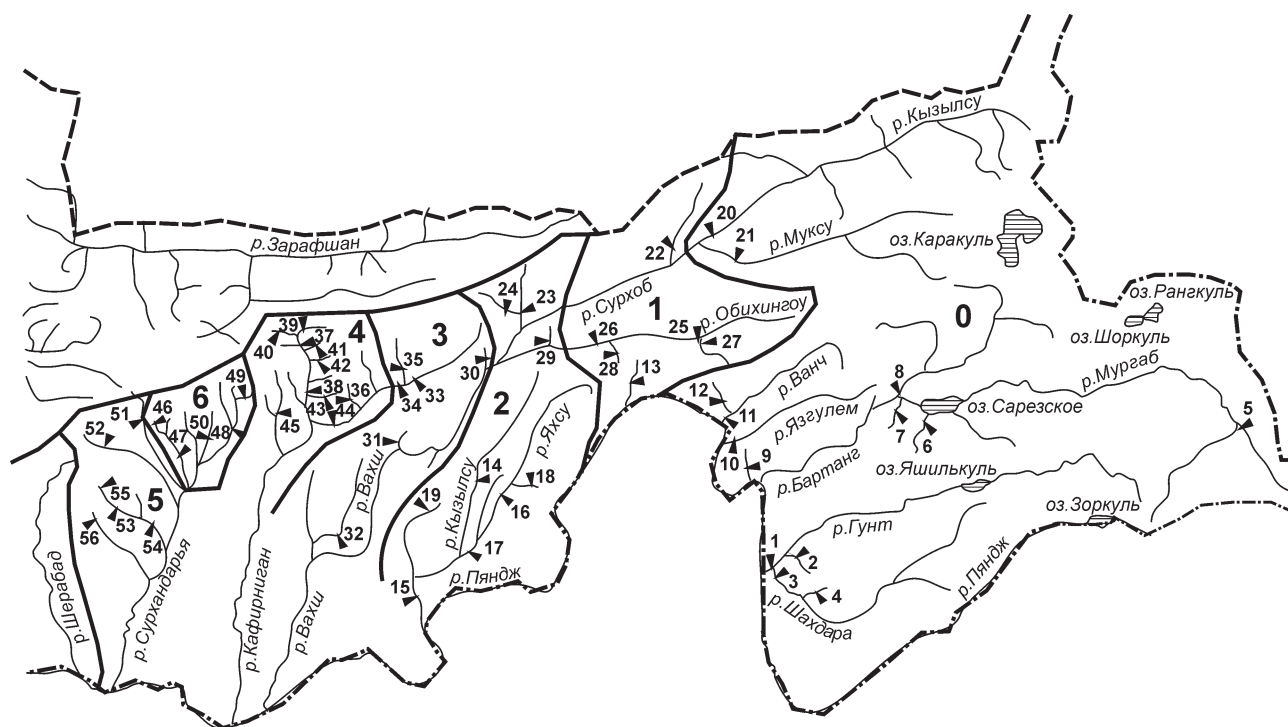
Для районирования территории использованы данные о среднем многолетнем стоке на 56 постах, рассчитанные за период наблюдений. Длина рядов была не менее 10 лет (табл. 1). При выделении однородных районов не учитывались данные наблюдений на постах, расположенных на крупных реках, водо-

сборы которых находятся в пределах нескольких районов. Данные о средней взвешенной высоте бассейнов и распределении площадей бассейнов по высотным зонам взяты из [11].

В верхней части бассейна Амударьи выделено пять гидрологических районов, однородных по характеру распределения величин зонального стока (рис. 1). Кроме того, на исследуемой территории выделено два района, в которых из-за ограниченности материалов наблюдений не удалось установить устойчивую зависимость модуля стока от высоты бассейнов. На рис. 1 эти районы обозначены цифрами 0 и 6.

*Район 0* расположен в высокогорной части Памира. Гидрологические посты здесь характеризуют в основном сток на главных реках, водосборы которых могут находиться в нескольких районах, а увлажнение речных бассейнов отличается большой пространственной изменчивостью, связанной с разной ориентацией склонов. Именно поэтому имеющаяся сеть наблюдений не позволяет выделить на данной территории однородные районы.

*В районе 6* имеется всего пять гидропостов, причем четыре из них – на реках, режим которых сильно изменён в результате хозяйственной деятельности. Это также не позволяет получить адекватные величины зонального стока при решении обратной задачи.



**Рис. 1.** Районирование верхней части бассейна Амударьи по характеру распределения величин зональных модулей стока с высотой.

1 – 6 – районы; 1 – 56 – номера постов; см. пояснения см. в тексте

**Fig. 1.** Regionalization of Upper Amu Darya basin according to the dependence of the zonal specific runoff values on altitudes (a).

1 – 6 – regions; 1 – 56 – number of posts; see explanations in the text

Таблица 1. Список гидрологических постов (см. рис. 1), данные наблюдений на которых использовались для решения задачи о зональном стоке

Номер поста	Река	Пункт	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Средняя взвешенная высота, км	Длина ряда наблюдений, годы	Номер района	Модуль стока, (л/с) км <sup>2</sup>	
							по данным наблюдений	по расчётам
1	Гунт	Г. Хорог	13 700	4,17	54	0	7,63	—
2	Шоридара	Устье	189	4,1	44	0	18,03	—
3	Шахдара	Хабост*	4180	4,16	53	0	8,23	—
4	Анджандара	Анджан	88	4,18	12	0	12,2	—
5	Бартанг	Тохтамыш	3090	4,49	24	0	3,42	—
6	Лянгар	Устье	335	4,65	49	0	11,2	—
7	Вовзит	Барчадив	100	4,46	31	0	11,96	—
8	Кудара	Устье	4500	4,48	34	0	7,68	—
9	Вомардара	Вомар	87,1	3,78	15	0	23,2	—
10	Язгулем	Мотравн	1940	3,92	52	0	18,68	—
11	Ванч	Ванч	1920	3,78	25	0	25,7	—
12	Гуфуф	Ванч	59,8	3,61	10	0	37,6	—
13	Обихумбоу	Устье	709	3,26	33	1	27,25	27,45
14	Кызылсу	Бабаханшайд-Дашт	1790	1,76	38	2	17,32	15,97
15	Кызылсу	Саманчи	6200	1,21	40	2	12,53	10,32
16	Яхсу	Карбозтонак	1390	2,04	47	2	24,39	23,74
17	Яхсу	Пгт им. Восе	2650	1,6	45	2	10,42	14,39
18	Обишур	Устье	176	1,63	11	2	10,7	11,97
19	Таирсу	Шахбур	460	1,1	41	2	2,4	1,73
20	Кызылсу	Домбрачи	8370	3,54	36	0	8,44	—
21	Муксу	Давсеар	6550	4,54	26	0	17,01	—
22	Питаукуль	Ярмазар	531	3,31	30	1	30,3	29,13
23	Сарбог	Саги-Малика	1760	3,14	45	2	39,07	37,12
24	Сангикар	Сангикар	291	2,96	48	2	40,62	37,75
25	Обихингоу	Сангвор	1880	3,99	44	1	31,6	29,6
26	Обихингоу	Тавиль-Даре	5390	3,59	32	1	29,59	27,15
27	Обимазар	Сангвор	1030	3,91	34	1	28,5	30,8
28	Сарыуб	Калаисанг	304	2,88	31	1	19,45	20,06
29	Сурхсу	Шаков	255	2,85	31	2	41,34	39,76
30	Даштигурон	Колхоз «8 марта»	36,4	2,13	40	3	21,89	21,65
31	Нурек	Дагана	80,8	1,5	31	3	7,92	6,72
32	Явансу	Ходжакала	1190	1,4	11	3	0,55	0,62
33	Кафирниган	Рамит	1260	2,82	33	3	33,47	32,74
34	Кафирниган	Чинар	3040	2,64	61	3	33,11	32,12
35	Сардай-Миена	Рамит	1190	2,88	41	3	34,68	34,47
36	Семиганч	Семиганч	79,3	2,28	38	4	32,42	32,23
37	Варзоб	Гушари в 0,5 км выше устья р. Курортная	716	3,05	18	4	44,41	39,56
38	Варзоб	Дагана	1270	2,67	67	4	36,21	34,44
39	Зидды	Зидды	181	3,13	38	4	43,86	42,35
40	Сиома	Устье	176	3,3	27	4	40,21	40,98
41	Курортная	Гушари	19,2	2,26	41	4	33,79	31,29
42	Оджук	Варзоб	77,1	2,35	41	4	25,42	28,27
43	Харангон	Чехак	66,6	2,06	43	4	24,26	25,93
44	Иляк	Наобад-Боло	516	1,67	11	3	9,59	11,43
45	Ханака	Алибеги	362	2,29	60	4	29,79	27,2
46	Шаргун	Шаргун	59,2	2,06	10	6	15,54	—
47	Обизаранг	Дашнабад	330	2,1	50	6	14,86	—
48	Каратаг	Каратаг	684	2,65	58	6	33,5	—
49	Савургон	Пшти-Миона	134	2,23	42	6	23,99	—
50	Шеркент	Дебивак	282	2,46	25	6	25,5	—
51	Тупаланг	Зарчоб	2200	2,57	35	5	24,17	24,41
52	Сангардак	Кинг-Гузар	901	2,35	58	5	17,69	14,28
53	Халкаджар	Базар-Джой	577	2,15	34	5	11,41	12,93
54	Халкаджар	Карлюк	762	1,9	10	5	7,48	10,23
55	Аксу	В 1,1 км от устья	49,1	1,9	33	5	8,83	9,5
56	Хангарансай	Байсун	40,3	2,31	27	5	13,83	15,83

\*Приведены названия кишлаков



По каждому из выделенных однородных районов на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова получены значения зональных модулей стока для разных высотных диапазонов. Высотные зоны брались с интервалом 600 м, за исключением самых верхних частей бассейнов. Размер водосборной площади верхних диапазонов мал по сравнению с другими высотными диапазонами. Их вклад в интегральный модуль стока, по формуле (1) равный произведению зонального модуля стока с этих диапазонов на их относительную площадь, меньше погрешности его определения, поэтому крайние высотные диапазоны укрупнились.

Число высотных диапазонов зависело также от числа гидропостов в каждом районе. В районах 2 и 3 задача решена для семи высотных диапазонов, в районах 1, 4 и 5 – для шести. В табл. 1 приведены данные наблюдений и результаты определения модуля стока для этих пунктов. Расчёт интегрального модуля стока выполнялся по полученным значениям зональных модулей стока.

*Район 1* включает в себя реки северной части Западного Памира: Обихумбоу, Обихингоу до Тавиль-Дарье, их притоки и р. Питаукуль (см. рис. 1). Эти реки стекают с хребтов Петра Первого, Дарвазского и Алайского. Средняя взвешенная высота бассейнов в основном существенно превышает 3000 м (см. табл. 1). По характеру гидрологического режима, в соответствии с классификацией рек В.Л. Шульца [15], большинство этих рек относится к ледниково-снеговому типу питания; Обихумбоу – к снего-ледниковому типу (здесь и далее тип питания рек Средней Азии приведён в соответствии с [15]). В.Л. Шульц в работе [15] указывал, что о типе питания реки можно говорить только в определённом створе, так как при продвижении вниз по реке условия питания в горных регионах меняются, поэтому в одном районе могут присутствовать реки с разным типом питания.

*Район 2* – бассейны р. Яхсу и её притоков, имеющих снего-дождевое питание. Сюда же включены расположенные выше посты на реках Сарбог, Сурхсу и Сангикар. Их водный режим относится к ледниково-снеговому типу.

В *район 3* вошли р. Кафирниган и её притоки, а также правые притоки Вахша, Нурика и Явансу. Средняя высота бассейнов этих рек, как правило, не превышает 3000 м. Типы питания – снего-ледниковый и снеговой.

*Район 4* включает в себя р. Варзоб с притоками, а также р. Ханака (правый приток р. Кафирниган). Средневзвешенные высоты бассейнов изменяются от 1800 до 3300 м. Реки стекают с южных склонов Гиссарского хребта и имеют разное питание: снеговое, снего-ледниковое и ледниково-снеговое.

*Район 5* объединяет правые притоки р. Сурхандарья со средними высотами бассейнов не более

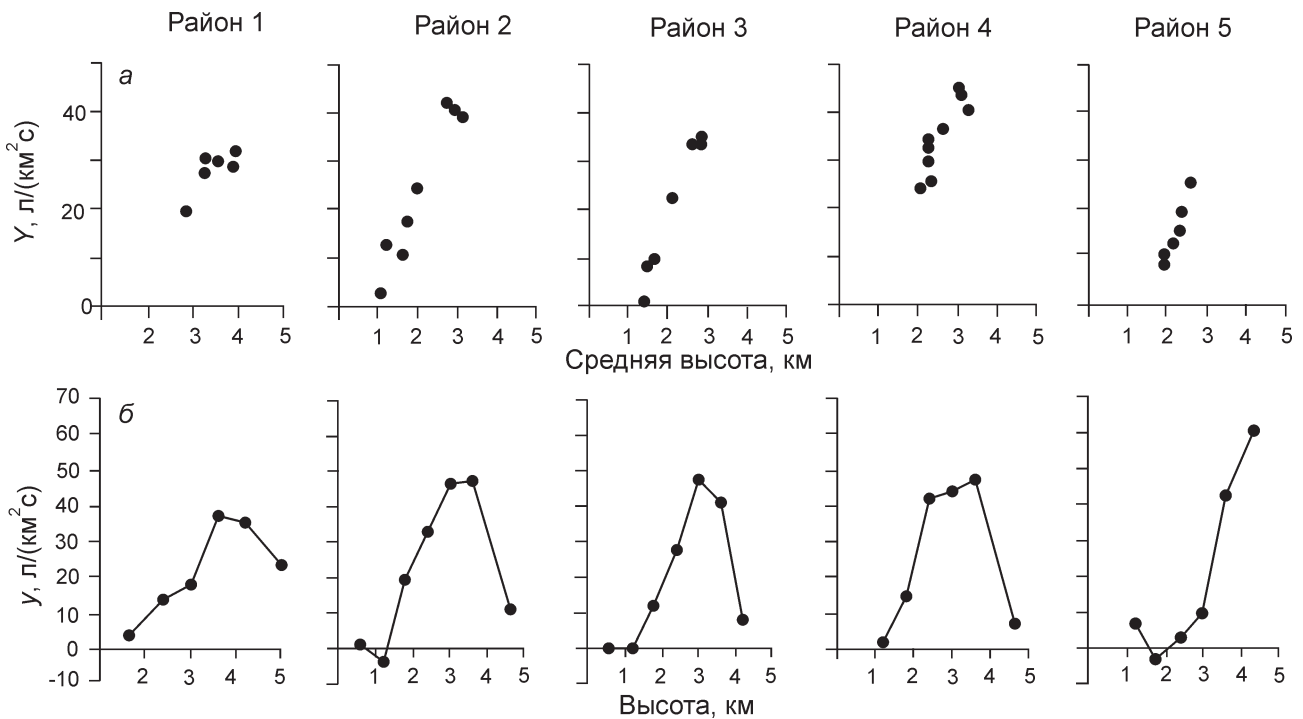
2570 м. Эти реки имеют снего-ледниковое (Тупаланг), снеговое (Сангардак) и снего-дождевое (Халакаджар, Аксу) типы питания.

**Результаты решения обратной задачи о зональном стоке.** На рис. 2 представлены полученные в результате решения обратной задачи значения зональных модулей стока в различных высотных диапазонах и зависимости интегрального модуля стока от средне-взвешенной высоты бассейна для выделенных районов. Главная особенность полученных решений для всех однородных районов – наличие зоны максимальных значений на графике зависимости зонального модуля стока от высоты. Подобный характер зависимости выделялся ранее в [2] для ряда районов МНР. М.Н. Большаков, применяя метод подбора для решения обратной задачи (2), «волевым» путём принял, что, начиная с некоторой высоты, зональный сток остаётся постоянным. С его предположением сложно согласиться, поэтому рассмотрим условия формирования стока в горных районах более подробно.

Известно [3], что оптимальный для формирования стока баланс тепла и влаги свойствен высотной зоне, расположенной между фирновой линией и концами языков ледников. Выше фирновой линии сток быстро затухает из-за низких температур и прекращения поверхностного таяния. Низкие значения стока в горных районах обычно приурочены к высотной зоне выхода рек из гор. Это связано с тем, что, во-первых, в районах с аридным типом климата испаряемость в данной зоне преобладает над осадками. Во-вторых, при пересечении реками предгорных шлейфов существенная часть поверхностного стока может теряться в рыхлых отложениях конусов выноса.

На величину зонального стока некоторое влияние может оказывать также перераспределение снега лавинами с вышележащих на более низкие участки бассейнов. Так, в монографии [9] приводятся следующие данные о лавинной деятельности на исследуемой территории. Зона, где за зиму лавинами сносится более 10 000 м<sup>3</sup> снега, охватывает практически всю территорию региона Памиро-Алая, за исключением Восточного Памира. Максимальная высота падения лавин колеблется от 1,4 до 2 км. Так, в бассейне р. Кафирниган регулярно сходят лавины объёмом более 1 млн м<sup>3</sup>, относительная высота их падения может достигать 2,0–2,2 км.

Полученные значения зонального стока для выделенных районов не противоречат этим закономерностям (см. рис. 2). Согласно [9], граница фирновой линии располагается в исследуемом районе на высотах от 3600 до 4000 м, а граница нижнего края чистого льда языков – на высотах 3200–3900 м. Максимальные значения модуля стока в районе 1 отмечаются на высотах 3300–4500 м, в районе 2 – от 2700 до 3900 м, в районе 3 – в диапазоне 2700–3300 м, в районе 4 – от



**Рис. 2.** Зависимости средних многолетних интегральных модулей стока  $Y(a)$  и величины зональных модулей стока  $y(b)$  от высоты бассейнов

**Fig. 2.** Dependences of the annual average integral specific runoff  $Y(a)$  and values of zonal specific runoff  $y(b)$  on the average basin altitudes

2100 до 3900 м, в районе 5 – в диапазоне 3900–4500 м. В нижних частях бассейнов вычисленные параметры зональных модулей стока уменьшаются до величин, близких к нулю; в ряде районов они даже имеют незначительное отрицательное значение. В этой ситуации полученное численное значение зонального стока характеризует не сам сток, а баланс между его приходной и расходной частями на данном участке. Отрицательные величины, полученные в результате решения обратной задачи, указывают на то, что в данной части водосборного бассейна русловые потери превышают местный приток и происходит рассеивание стока. Для ряда рек Центрально-Азиатского региона рассеивание стока приводит к их полному исчезновению после выхода из гор.

**Определение стока рек для неизученных водосборов с использованием значений зонального стока**

Предлагаемая методика позволяет получать значение годового стока неизученных водосборов, т.е. при отсутствии гидрологических наблюдений. Если интересующий нас створ (водосбор) попадает в однородный гидрологический район, для которого решена задача о зональном стоке, то для этого створа определяется распределение площади по высотным диапазонам с использованием либо топографических карт крупного масштаба, либо цифровых моде-

**Таблица 2.** Величины модуля стока, рассчитанные по решению обратной задачи о зональном стоке, и их сравнение с данными измерений

Река	Пост	Модуль стока, (л/с) км <sup>2</sup>		Отклонение	
		измеренный	рассчитанный	(л/с) км <sup>2</sup>	%
Кызылсу	Бабаханш аид-Дашт	17,32	14,04	-3,28	-19
Яхсу	Карбозтонак*	24,39	23,37	-1,03	-4
Яхсу	Пгт. им. Восе	10,42	15,13	4,72	45
Обишур	Устье	10,7	13,52	2,82	26
Таирсу	Шахбур	2,4	0,76	-1,64	-68
Сарбог	Саги-Малика	39,07	37,92	-1,15	-3
Сангикар	Сангикар	40,62	37,19	-3,43	-8
Сурхсу	Шаков	41,34	39,56	-1,78	-4
Кызылсу	Самончи	12,53	9,24	-3,3	-26

\*Приведены названия кишлаков.

лей рельефа местности. Затем, с использованием результатов решения обратной задачи о зональном стоке для данного однородного района, рассчитывается сток для исследуемого створа по уравнению (2). В табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчётов годового стока для каждого поста по очереди из однородного района 2 в предположении, что в этом пункте отсутствуют данные наблюдений (неко-

торый аналог метода выбрасываемой точки, применяемого при оценке погрешностей картируемых гидрологических характеристик) [13].

Задача о зональном стоке для района 2 решалась для всех оставшихся постов без учёта данных о стоке по выбранному посту. Затем по полученным величинам зонального стока рассчитывалась величина его интегрального стока и результат сравнивался с нормой стока, определённой по данным измерений. Расчёты показали, что метод в целом характеризуется приемлемой точностью, а наибольшие ошибки возникают только в случае малых величин модулей стока.

### Влияние сокращения площади ледников на речной сток

В настоящее время практически во всех горных районах Земли площадь оледенения сокращается [1, 4, 9, 10], однако скорость отступления ледников непостоянна. Так, согласно результатам, полученным в [9], в западной и центральной частях Памиро-Алая – в бассейнах рек Сурхоб, Варзоб, Кафирниган – с 1950-х до начала 1970-х годов границы ледников изменялись незначительно. Данные исследований, приведённые в [10], свидетельствуют, что в начале 1970-х годов началось более активное сокращение оледенения в этом регионе.

Для оценки влияния сокращения площади ледников на речной сток рассчитаны величины зональных модулей стока для выделенных районов по двум временным интервалам. Первый интервал содержал ряды наблюдений стока на гидропостах с начала наблюдений на каждом из них до 1970 г., второй – наблюдения начиная с 1970 г. Более точно определить дату резкого изменения режима ледников сложно, поскольку инвентаризация ледников в те годы не базировалась на спутниковой информации и выполнялась с интервалом 10 лет и более. Использовались данные наблюдений на 36 гидрологических постах (среднемесячные расходы воды). Для наиболее короткого ряда продолжительность наблюдений составила 27 лет.

На рис. 3 приведены вычисленные среднегодовые и средние за период максимальной водности величины зонального стока за периоды до и после 1970 г. для районов 1–4. В районе 5 данные о средних месячных расходах воды имеются только для четырёх постов, что недостаточно для решения обратной задачи.

На сокращение стока рек исследуемого района в настоящее время указывали многие авторы [1, 10], однако существующие методы исследования не позволяли детализировать эти изменения по высоте. Наши результаты решения обратной задачи показывают, как изменяется водоносность рек на различных высотах бассейна (см. рис. 3). Существенно понизились величины модулей стока, приуроченные к высотам 3000–4000 м, где они максимальны, особенно ярко это проявилось в период максимальной

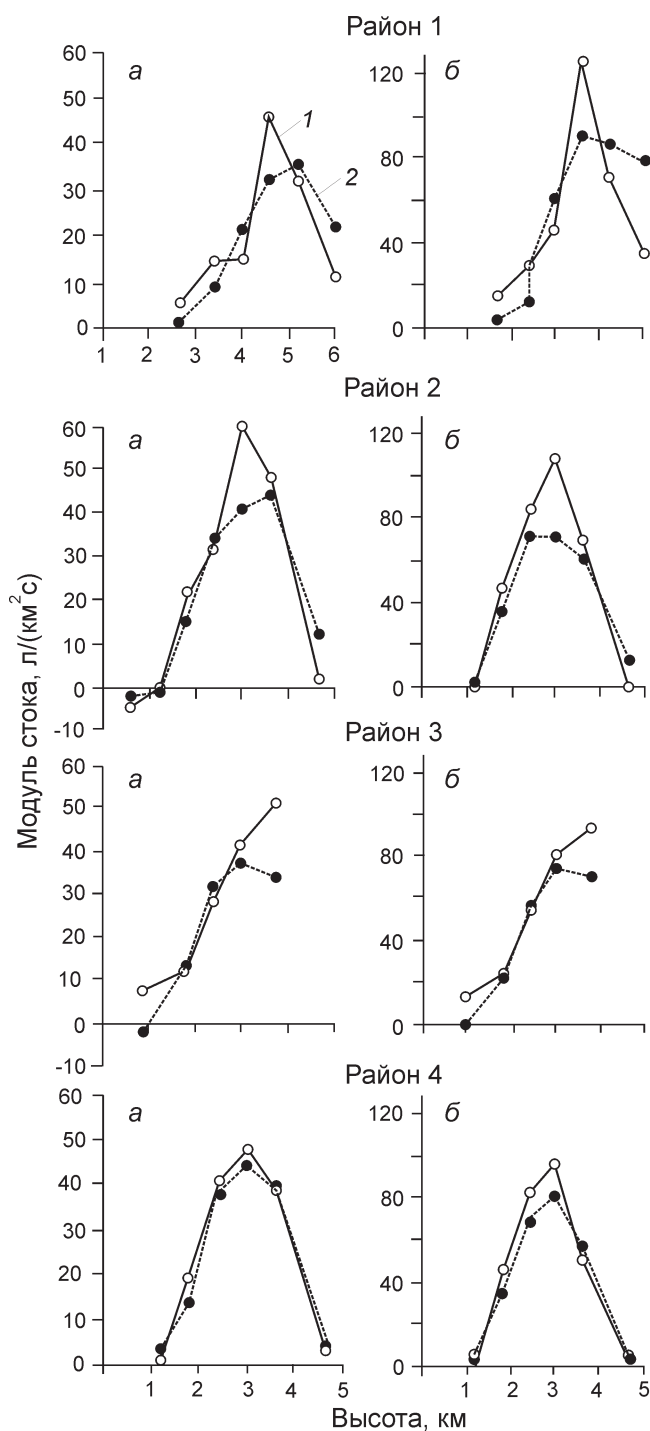


Рис. 3. Рассчитанные величины зонального стока за периоды до (1) и после (2) 1970 г.:

а – среднегодовые; б – средние за период максимальной водности  
 Fig. 3. Calculated values of zonal runoff for the periods before (1) and after (2) 1970:  
 а – annual; б – averaged for the period of maximal water discharge

водности. Причиной этого явления следует считать общую тенденцию уменьшения осадков в регионе [6]. Величины зонального стока в верхних высотных

диапазонах (3600–4000 м), напротив, несколько увеличилось, что, вероятно, связано с более интенсивным таянием ледников после 1970 г. и смещением границы фирновой линии кверху. Поскольку изменения водоносности рек на разных высотных диапазонах имеют разную направленность, очевидно, что изменения стока каждой конкретной реки зависят от распределения площади бассейна по высотам, что важно учитывать при прогнозировании стока.

### Выводы

В бассейне Верхней Амударьи уточнены границы гидрологических районов, однородных по характеру распределения величин зонального стока. Для каждого из них методом регуляризации А.Н. Тихонова решена задача о зональном стоке и получены значения зональных модулей стока для разных высотных диапазонов. Показана возможность применения предлагаемого метода для определения стока рек неизученных водосборов. Используемый метод позволяет оценить, как меняется водоносность рек на различных высотных участках водосбора в связи с климатическими изменениями. Расчёты показали, что после 1970 г. во всех районах на высотах менее 4000 м водоносность снизилась, что связано с уменьшением количества осадков, но при этом увеличился сток с верхних частей водосбора (выше 4000 м), что объясняется ростом интенсивности таяния ледников.

Результаты, опубликованные в данной статье, получены при поддержке Международного проекта «Джайхун».

### Литература

1. *Агальцева Н.А., Коновалов В.Г.* Ожидаемые изменения размеров оледенения и стока рек при различных сценариях будущего климата Земли // Биржа интеллектуальной собственности. 2005. Т. IV. № 8. С. 37–47.
2. *Болгов М.В.* Дождевые паводки на водотоках МНР // Метеорология и гидрология. 1985. № 6. С. 51–57.
3. *Большаков М.Н.* Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. Фрунзе: Илим, 1974. 306 с.
4. *Вилесов Е.Н., Горбунов А.П., Морозова В.Н., Северский Э.В.* Деградация оледенения и криогенез на современных моренах северного Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 1. С. 69–73.
5. *Воеводин В.В.* О методе регуляризации // Журнал вычислит. математики и математич. физики. 1969. Т. 9. № 3. С. 671–673.
6. *Коновалов В.Г., Вильямс М.С.* Многолетние колебания оледенения и стока рек Центральной Азии в современных климатических условиях // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 69–83.
7. *Корень В.И., Кучмент Л.С.* Решение обратных задач для моделей стока с распределенными параметрами (на при-

- мере уравнений Сен-Венана) // Тр. IV Всесоюз. гидрологич. съезда. 1975. Т. 7. С. 208–218.
8. *Морозов В.А.* О принципе невязки при решении несовместных уравнений методом регуляризации А.Н. Тихонова // Журнал вычислит. математики и математич. физики. 1973. Т. 13. № 5. С. 1099–1111.
  9. Оледенение Памиро-Алая. М.: Наука, 1993. 256 с.
  10. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. 483 с.
  11. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Амударья. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
  12. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 222 с.
  13. *Христофоров А.В.* Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 168 с.
  14. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. М.: Географгиз, 1949. 196 с.
  15. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 691 с.
  16. *Шульц В.Л., Шалатова Л.И., Лукина Н.К., Видинеева Е.М.* Гидрологическая характеристика верхней части бассейна Амударьи. Ташкент: изд. ФАН УзССР, 1975. 120 с.
  17. *Doherty J., Skahill B.E.* An advanced regularization methodology for use in watershed model calibration // Journ. of Hydrology. 2006. V. 327. P. 564–577.
  18. *Loon E.E. van, Troch P. A.* Tikhonov regularization as a tool for assimilating soil moisture data in distributed hydrological models // Hydrological processes: an International Journal. 2002. V. 16. P. 531–556.

### Summary

Specific features of the runoff altitudinal zonality for rivers with significant part of ice melting in their feeding are studied on the example of the Upper Amy Darya River basin. For the regions homogeneous according to the dependence of runoff on the catchment altitude, the problem of zonal runoff is solved: values of the runoff coming from different altitudinal zones are derived from the runoff data measured on closing gauge stations. The problem is the ill-posed inverse one; to solve it, Tikhonov regularization is used. For each of the regions, annual average values of the specific zonal runoff are received, and the borders between zones of runoff generation and losses are found. The possibility to apply this method for the estimating of the runoff from the unexplored catchments is shown. The influence of the shrinkage of glaciation area on runoff values is studied. For the two time-periods: before 1970 and after 1970 – values of zonal runoff averaged for the high water period and for the whole year were estimated for each of the homogeneous hydrological regions. During the period after 1970, values of runoff decreased at the altitudes lower than 4000 m, while in the upper parts of the catchments (higher than 6000 m) increasing of the runoff is registered. The displacement of the area of maximal runoff values on higher altitudes is also found out.