

ОСОБЕННОСТИ ЗОНАЛЬНОГО СТОКА РЕК БАСЕЙНА ВЕРХНЕЙ АМУДАРЬИ В МАЛОВОДНЫЕ И МНОГОВОДНЫЕ ГОДЫ

© 2012 г. М.Д. Трубецкова

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: зональный сток, обратные задачи, высокая водность, регуляризация Тихонова, низкая водность, ледниковый сток, Верхняя Амударья.



Рассмотрены особенности зонального стока рек в годы с повышенной и пониженной водностью для однородных гидрологических районов бассейна Верхней Амударьи. Путем решения некорректно поставленной обратной задачи получены значения зонального стока для весеннего и летнего периодов для многоводного и маловодного года. Показано, что в маловодные годы большую роль приобретает ледниковая составляющая стока.

Введение

Сток Амударьи вносит основной вклад в суммарные водные ресурсы Аральского бассейна, составляя более двух третей от их величины. Современное изменение глобального климата оказывает непосредственное влияние на речной сток. В работе [1] показано, что в среднесрочной и долгосрочной перспективе ожидается уменьшение стока р. Амударьи, что не может не сказаться на хозяйстве всего Аральского региона. Более 80 % стока Амударьи формируется в горной части бассейна. В связи с этим особенно актуальным является подробное изучение особенностей формирования стока Верхней Амударьи, в частности, распределение стока по высоте.

В горах ярко проявляется наличие высотной поясности климатических и гидрологических процессов. Удельная водоносность реки может изменяться от величин, близких к нулю, в низовьях до $100 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ в высокогорной зоне наиболее

активного формирования стока [2]. Поэтому широкое распространение получил метод описания стока горных рек в зависимости только от высоты местности: путем построения зависимостей модуля стока от средней взвешенной высоты бассейна. Эти зависимости строятся для гидрологических районов, внутри которых изменение модуля стока с высотой считается одинаковым. Однако большая часть гидропостов в горных районах расположена в створах рек при выходе из гор, в частности, 90 % гидропостов бассейна Амударьи установлены на высотах ниже 2 км. В связи с этим модуль стока, рассчитанный по измерениям на этих постах, характеризует лишь среднюю удельную водоносность бассейна, но не отражает высотную поясность в ее распределении и не описывает сток с верхних высотных диапазонов. Поэтому для изучения стока горных рек целесообразно использовать другой подход: определять величину стока с определенных высотных зон водосборов (зональный сток) [2–4].

В данной работе рассмотрен зональный сток рек бассейна Верхней Амударьи и его особенности в годы с высокой и низкой водностью.

Постановка задачи о зональном стоке

Понятия зонального и интегрального модуля стока ввел М.Н. Большаков в [2]. Он предложил метод зональных модулей для определения нормы годового стока в неизученных створах горных рек. Модуль стока M , вычисленный для всей площади бассейна выше замыкающего створа S (интегральный модуль стока), можно представить как сумму величин модулей стока m_i (зональных модулей стока), поступающих с разных высотных зон этого бассейна, внутри каждого из которых удельная водоносность не меняется:

$$M = \sum_{i=1}^n s_i m_i, \quad (1)$$

где i – номер высотной зоны;

s_i – относительная площадь i -ой высотной зоны (площадь высотной зоны в долях от площади бассейна);

n – число высотных зон, выделенных на водосборе.

Если рассматривать горный район с однородными физико-географическими условиями (такими как ориентация горных склонов по отношению к направлению переноса воздушных масс, доступности водосборов этим воздушным массам,

синоптических процессов), то можно принять, что для всех рек внутри данного района величины зонального модуля стока внутри одних и тех же высотных зон приблизительно одинаковы. Тогда для каждого водомерного поста внутри такого района можно записать уравнение (1), и мы получаем систему линейных уравнений:

$$M_1 = \sum_{i=1}^n s_{1,i} m_i$$

$$M_2 = \sum_{i=1}^n s_{2,i} m_i$$

...

$$M_k = \sum_{i=1}^n s_{k,i} m_i,$$

Или в матричном виде:

$$Sm = M, \tag{2}$$

где S – матрица с элементами $s_{k,i}$;

k – номер водомерного поста.

Решение системы уравнений (2) даст нам величины зональных модулей стока в однородном гидрологическом районе.

При решении задачи (2) возникают математические трудности, т. к. она относится к классу некорректно поставленных обратных задач. Это означает, что решение системы (2) может быть не единственным, и даже небольшие изменения исходных данных могут значительно изменить получаемое решение. Точное решение этой системы найти невозможно или оно не имеет смысла. Приближенное же решение, полученное традиционными методами, в силу некорректности задачи может сильно отличаться от искомого, т. к. измерения расходов воды и площадей водосборов неизбежно имеют погрешности. М.В. Болгов в [3] предложил применить метод регуляризации Тихонова решения некорректно поставленных обратных задач [4] для нахождения приближенного решения задачи о зональном стоке рек Монголии. Решение системы линейных алгебраических уравнений вида $A \cdot y = Y$ методом регуляризации Тихонова сводится к минимизации параметрического функционала $\|A \cdot y - Y\|^2 + \alpha \cdot \|y\|^2$, где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации. Значение параметра регуляризации α определяется по принципу невязки из условия: $\rho(\alpha) = \delta \cdot \|Y\|$, где: $\rho(\alpha)$ – невязка на регуляризованном решении, δ – задаваемый относительный уровень ошибки правой части уравнения (1), $\|Y\|$ – евклидова норма правой части уравнения $A \cdot y = Y$. Относительный уровень невязки

δ характеризует погрешности правой части этого уравнения, в случае нашей задачи – погрешность определения значений среднего многолетнего модуля стока.

В [4] был исследован зональный сток горных рек бассейна Верхней Амударьи. На основе решения обратной задачи (2) методом регуляризации Тихонова территория бассейна была разбита на гидрологические районы, однородные по признаку характера изменения величин зональных модулей стока с высотой, и для каждого района вычислены значения средних многолетних величин зонального стока. Районирование бассейнов Верхней Амударьи, Зеравшана и Кашкадарьи приведено на рис. 1.

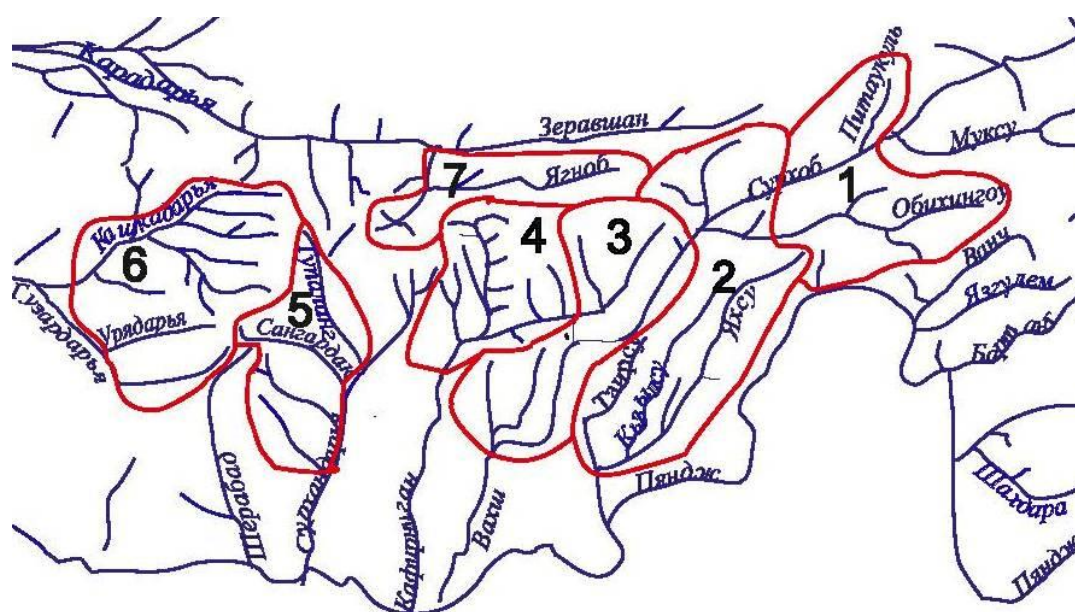


Рис. 1. Однородные гидрологические районы бассейнов Верхней Амударьи, Зеравшана и Кашкадарьи.

Годы с различной водностью в бассейне Верхней Амударьи

Для понимания механизма формирования стока важно исследовать, как изменяются значения зонального модуля стока разных высотных зон в годы с различной водностью. За период наблюдений самым многоводным годом на всей территории бассейна Верхней Амударьи был 1969 г. Годовые величины расходов подавляющего числа рек превышали средние многолетние значения в несколько раз.

Причиной этого послужило выпадение аномально высокого количества осадков на протяжении всего года (рис. 2).

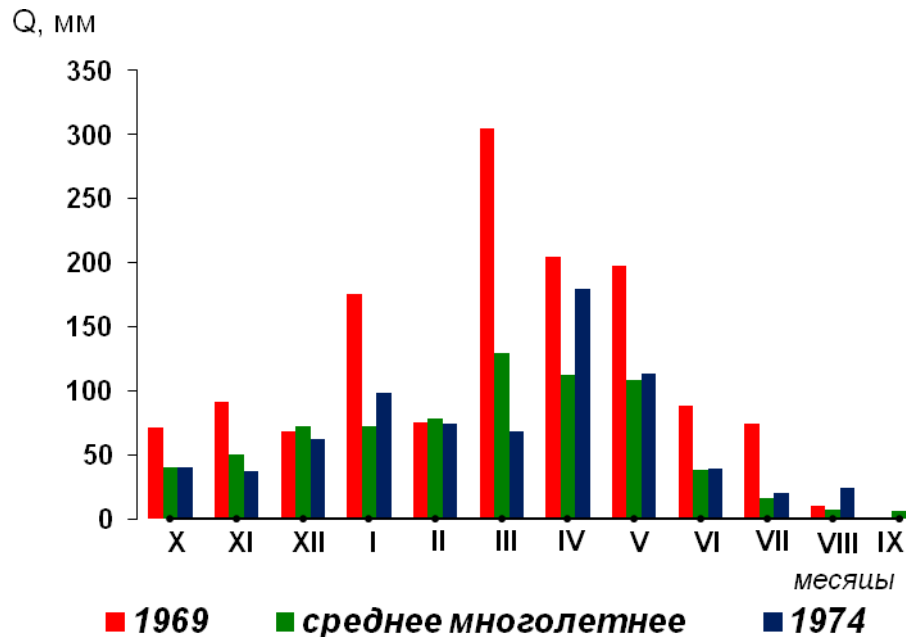


Рис. 2. Месячные суммы осадков Q на метеостанции Гарм в многоводный (1969), маловодный (1974) годы и средние за период наблюдений.

За этот же период наблюдений на территории бассейна Верхней Амударьи выявилось несколько относительно маловодных лет. Для анализа был выбран 1974 г., поскольку он лучше всего освещен данными гидрометеорологических наблюдений. Необходимо отметить, что суммы осадков за 1974 г. на метеостанциях ненамного отличаются от средних многолетних величин и не представляется возможным сделать однозначный вывод о причинах понижения стока на реках в этом году.

Характеристика однородных гидрологических районов

Исследование проводилось для трех однородных районов бассейна Амударьи: районы 1, 2, 4 (см. рис. 1), лучше всего освещенных данными ежегодных наблюдений за стоком.

Район 1 включает в себя реки северной части Западного Памира: Обихумбоу, Обихингоу с притоками, Питаукуль. Эти реки стекают с протянувшихся в широтном направлении хребтов Дарвазского, Алайского и Петра Первого. Водосборы

расположены высоко, их средняя взвешенная высота в основном превышает 3 км. В целом, удельная водоносность рек этого района меньше по сравнению с реками районов 2 и 4 с аналогичными средними высотами водосборов. Район 1 расположен в удалении от основного источника влаги, поступающей с северо-запада и севера. С юго-запада бассейн Обихингоу экранирован Дарвазским хребтом. Вследствие этого, снегозапасы на высоте 2,0–2,5 км в этом районе меньше по сравнению с 2 и 4 районами. Однако незначительная (менее 3 км) высота экранирующего хребта в низовьях долины и огромные высоты хребтов Петра Первого, Академии наук и Дарвазского создают благоприятные условия для формирования значительных снегозапасов на высоте 3,5–4,0 км: до 1000–1500 мм [6]. По характеру гидрологического режима, в соответствии с классификацией рек В.Л. Шульца (здесь и далее тип питания рек Средней Азии приведен в соответствии с [7]), эти реки относятся к ледниково-снеговому типу питания [8]. На этих реках половодье начинается в апреле-мае и заканчивается октябре-ноябре, наибольшие расходы и гребень волны половодья приходятся на июль-август.

Район 2 включает бассейны р. Яхсу и ее притоков, питание этих рек снего-дождевое. Основная роль в формировании половодья рек этого типа питания принадлежит сезонным снегам, вклад ледникового стока незначителен. Гребень половодья и максимальные расходы рек снего-дождевого питания приходятся в бассейнке Амударьи на май-июнь [8]. К району 2 также отнесены посты на реках Сарбог, Сурхсу и Сангикар; их водный режим относится к ледниково-снеговому типу. Реки района 2 расположены на периферийных хребтах Памиро-Алая и имеют южную экспозицию водосборов. Бассейны рек различаются по высоте: средние взвешенные высоты меняются от 1,1 до 3,14 км. Удельная водоносность района высока: значения модуля стока превышают 40 л/с·км² для водосборов со средними высотами около 3 км.

Район 4 включает в себя р. Варзоб с притоками. Реки стекают с южных склонов Гиссарского хребта и имеют разное питание: снеговое, снего-ледниковое и ледниково-снеговое. У рек снегового питания половодье начинается в конце февраля-начале марта и длится до июля-августа. Средние высоты бассейнов этих рек не отличаются большим диапазоном и меняются от 2,0 до 3,3 км. Водоносность рек максимальна для бассейна Амударьи, она меняется от 24 до 44 л/с·км². Это объясняется тем, что хребты Гиссарский, Зарафшанский и Петра Первого являются первым препятствием на пути влажных воздушных масс, проникающих сюда с юга и юго-запада, и количество осадков здесь велико [8].

Различия в среднегодовых значениях зонального стока в маловодные и многоводные годы

Для каждого из этих трех гидрологических районов рассчитаны среднегодовые значения зональных модулей стока в годы с различной водностью: для многоводного (1969) и маловодного (1974) года (рис. 3).

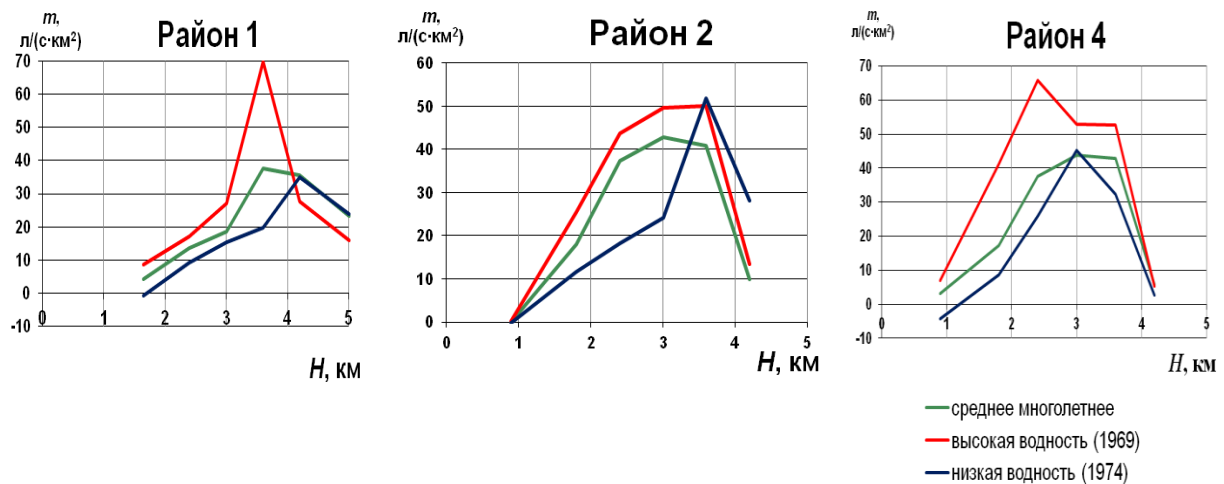


Рис. 3. Зональные модули стока m в зависимости от высоты H в годы с различной водностью.

В год с аномально высоким стоком (1969) имела место следующая картина. Зональный сток во всех трех исследованных однородных районах был существенно выше средних многолетних значений в высотном диапазоне 3,3–3,9 км. В более высоких диапазонах, где большую роль играет ледниковая составляющая стока, значения зонального стока несущественно отличались от среднемноголетних, а в районе 1 наблюдалось их понижение. В год с пониженным стоком (1974) в районах 1 и 2 наблюдалось смещение максимальных значений стока в более высокие части водосбора и увеличение их абсолютной величины по сравнению с многоводным годом. Это свидетельствует о более интенсивном таянии ледников в год с пониженной водностью.

Различия в сезонных значениях зонального стока в маловодные и многоводные годы

Для более подробного анализа годового распределения зонального стока в годы с различной водностью были проведены расчеты его значений для различных сезонов года: весеннего и летнего. Задача о зональном стоке (2) решалась по значениям модулей стока на гидропостах, осредненным для трех весенних (март-май) и летних (июнь-август) месяцев для многоводного и маловодного лет, а также для среднемноголетних значений весны и лета. Результаты приведены на рис. 4.

В районе 1 в весенний период максимальный зональный сток наблюдается в диапазоне 2,7–3,3 м. Абсолютные его значения невелики по сравнению с двумя другими районами, что можно объяснить меньшими снегозапасами в этом районе, связанными с его удаленностью от основных влагонесущих потоков. На высоте около 4 км сток затухает в связи с тем, что фронт снеготаяния в весенние месяцы еще не доходит до этой высоты.

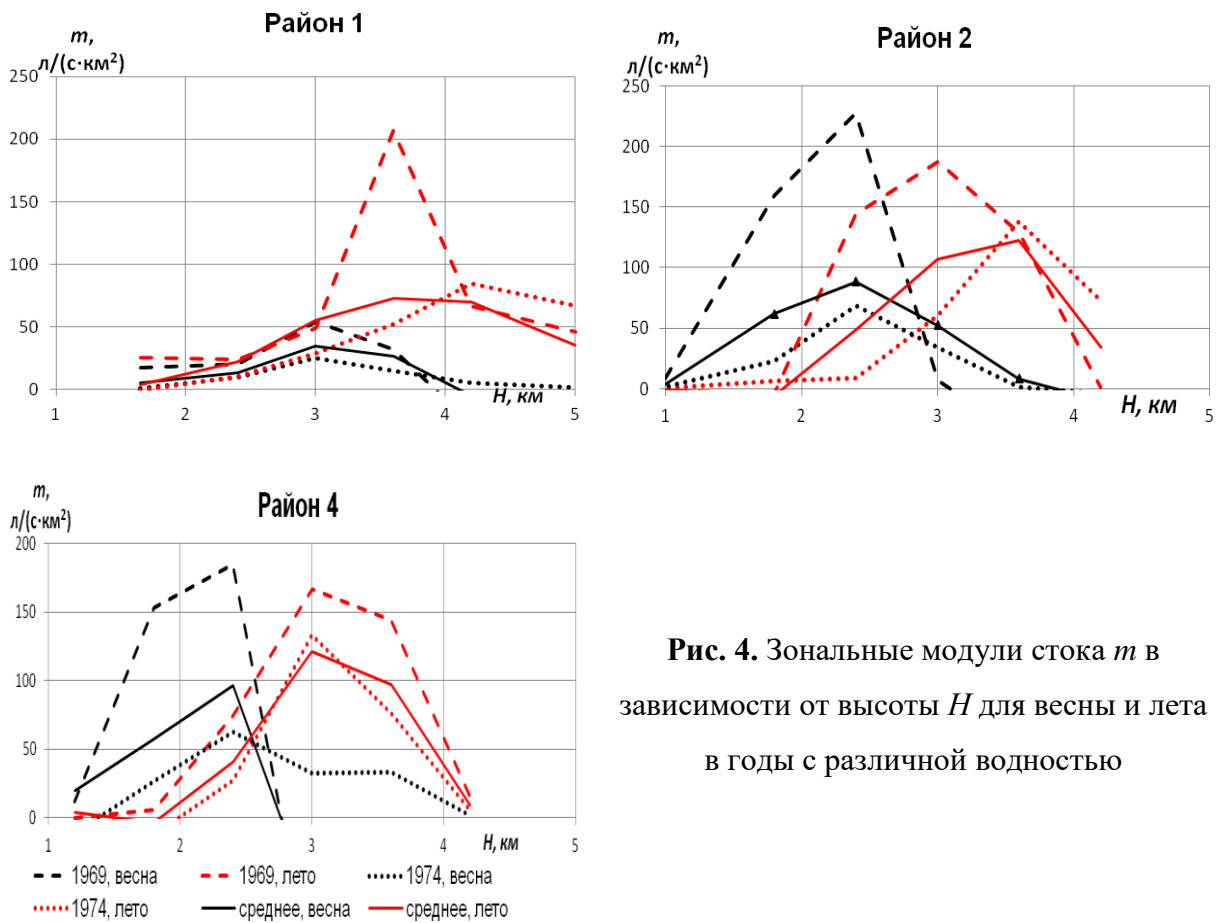


Рис. 4. Зональные модули стока m в зависимости от высоты H для весны и лета в годы с различной водностью

В год с аномально высокой водностью (1969) весенний сток затухает на меньшей высоте. Это, вероятно, связано с тем, что более мощный снежный покров, характерный для года с повышенным количеством осадков, вначале задерживает талую воду, водоотдача из снега начинается позже, и поэтому фронт снеготаяния продвигается вверх с запаздыванием. В год пониженной водности сток в районе 1 прослеживается до высоты 5 км, при этом значения зональных модулей на высотах менее 4 км понижены по сравнению со среднемноголетними. Вероятно, это объясняется меньшими снегозапасами и, как следствие, более быстрым продвижением вверх фронта снеготаяния. В летний период зона максимальных значений зонального стока смещается вверх, но высота ее различна в годы с разной водностью. В многоводном 1969 г. этот максимум наблюдался на высоте 3,3–3,9 км и был ярко выражен. Именно для этого диапазона высот наблюдалось максимальное превышение величины зонального стока по сравнению со среднемноголетним значением: более чем вдвое. В маловодный год зональный сток на высотах до 4 км был понижен, но в более

высоких частях бассейнов он превышал среднемноголетние значения и значения за многоводный год. Максимум стока в 1974 г. сместился вверх, в диапазон высот 3,9–4,2 км, что свидетельствует об увеличении доли ледниковой составляющей в стоке маловодного года. Таким образом, тенденция смещения максимума среднегодового модуля стока вверх в маловодные годы, прослеживаемая на графике средних величин зонального стока (см. рис. 3), в районе 1 происходит за счет летних месяцев и обеспечивается более интенсивным таянием ледников.

В районах 2 и 4 весеннее снеготаяние начинается раньше, максимальные зональные модули стока имеют более высокие значения по сравнению с районом 1 и приурочены к более низкому высотному диапазону: 2,1–2,7 км. В многоводном году зональный сток весной в средней части водосборов (на высотах от 1,5 до 2,7 км) оказался повышенным более чем вдвое по сравнению с многолетними значениями. Обращает на себя внимание, что здесь, в отличие от среднемноголетнего распределения, максимальные модули весной превысили летние значения.

В год с пониженным стоком значения весенних зональных модулей в районах 2 и 4 были понижены в низких и средних частях водосборов. В районе 4, как и в районе 1, в высоких частях бассейнов они оказались больше среднемноголетних: фронт снеготаяния в маловодный год весной продвинулся выше. В многоводном году, наоборот, сток в районе 4 весной затухал на меньшей высоте. В летние месяцы в маловодном году зональные модули были также понижены в среднем и низком высотных диапазонах, в высоких же диапазонах они были повышены по сравнению с среднемноголетним значением.

Значения зональных модулей стока в самых верхних диапазонах в летний период отражают интенсивность ледникового стока. Их повышенное значение в маловодные годы демонстрирует регулирующее влияние ледников на речной сток.

Выводы

1. В годы с высокой водностью, обусловленной повышенным количеством осадков, зона максимальных значений зонального стока смещается вниз по сравнению со средним ее положением. Сток с верхних высотных диапазонов сокращается, что свидетельствует об уменьшении ледникового стока.

2. В годы с низкой водностью зона максимальных значений зональных модулей стока смещается вверх. Более активное таяние ледников компенсирует

недостаток поступления воды в реки с более низких высотных диапазонов в маловодные годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агальцева Н.А., Болгов М.В., Спекторман Т.Ю., Трубецкова М.Д., Чуб В.Е.* Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 10. С. 58–69.
1. *Большаков М.Н.* Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. Фрунзе: Илим, 1974. 306 с.
2. *Болгов М.В.* Дождевые паводки на водотоках МНР // *Метеорология и гидрология*. 1985. № 6. С. 51–57.
3. *Болгов М.В., Трубецкова М.Д.* О высотной зональности стока рек со значительной долей ледникового питания // *Лед и снег*. 2011. № 1. С. 45–52.
4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 222 с.
5. *Котляков В.М., Рототаева О.В., Лебедева И.М., Бажев А.Б., Варнакова Г.М., Геткер М.И., Долгушин Л.Д., Канаев Л.А., Кеммерих А.О., Кренке А.Н., Муравская Р.В., Сезин В.М., Супруненко Ю.П., Суслов В.Ф., Тукеев О.В.* Оледенение Памиро-Алая / Отв. ред. В. М. Котляков. М.: Наука, 1993. 256 с.
6. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 691 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Амударьи. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

Сведения об авторе:

Трубецкова Марина Дмитриевна, младший научный сотрудник, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: trubets@mail.ru