

Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата

Н. А. Агальцева*, М. В. Болгов**,
Т. Ю. Спекторман*, М. Д. Трубецкова**,
В. Е. Чуб*

Рассмотрены результаты решения задачи оценки водности рек в условиях неопределенности прогнозов изменения климата и состояния водосбора на примере бассейна р. Амударья. При построении региональных климатических моделей применяли мультимодельный подход, использующий результаты нескольких глобальных моделей, и статистический метод даунскейлинга, детализирующий климатические сценарии. Расчеты показали, что в среднесрочной и долгосрочной перспективе ожидается уменьшение стока р. Амударья. Как результат приложения байесовской идеологии, на основе расчетов по формуле полной вероятности получена прогностическая кривая обеспеченности годового стока рек бассейна, основывающаяся на назначении разных весов оценкам среднего для разных климатических сценариев. Оценены прогностические характеристики годового стока для рек бассейна Амударьи в форме, приемлемой для гидрологических и водохозяйственных приложений.

1. Введение

Современное потепление глобального климата имеет как естественную, так и антропогенную составляющие. Поскольку неопределенность прогнозов долгосрочных изменений велика, необходимо рассматривать разные варианты прогноза потепления. Использование в гидрологических расчетах результатов глобального моделирования общей циркуляции атмосферы и океана для разных сценариев антропогенных выбросов парниковых газов позволяет это сделать. Но необходимо также отметить, что региональные климатические характеристики хуже воспроизводятся глобальными климатическими моделями, поскольку требуется учет множества региональных особенностей.

Существующие глобальные климатические модели отличаются входными параметрами относительно эмиссии парниковых газов и особенностями самих моделей. Для оценок на региональном уровне, как правило, отбирается несколько сценариев, принимаемых, по мнению специалистов, в качестве наиболее вероятных.

* Центр гидрометеорологической службы при Кабинете министров Республики Узбекистан.

** Институт водных проблем Российской академии наук; e-mail: bolgov@aqu.aqua.laser.ru.

Представляющая практическую ценность научная оценка на перспективу сложных, мало изученных явлений должна основываться на учете многообразия существующих современных представлений и многовариантности прогнозов глобального развития. Получить такие прогностические оценки можно, например, на основе байесовского подхода с учетом шансов реализации того или иного сценария. Основная сложность — оценка вероятности реализации этих сценариев, т. е. определение вероятности прогнозов, характеризующихся большой неопределенностью. Если сценарии, принятые научным сообществом, не имеют явных предпочтений друг перед другом, то в первом приближении можно принять, что их вероятность в будущем равна, а различия между ними могут быть учтены, например, путем введения распределения погрешности верификации или других ошибок моделирования.

В данной статье на примере бассейна р. Амударья рассмотрены результаты решения задачи оценки водности рек, в том числе и минимальной, в условиях значительной неопределенности оценок изменения климата и состояния водосбора. Последнее для данного бассейна важно, так как часть стока формируется вследствие таяния ледников в условиях деградирующего в регионе оледенения.

2. Общая информация о бассейне р. Амударья и подходы к оценке стока

Амударья — самая водоносная река в бассейне Аральского моря. Ее сток составляет 2/3 суммарных водных ресурсов Аральского бассейна, основной сток (83%) формируется на территории Таджикистана. Длина Амударьи от истока Пянджа до Аральского моря — 2540 км. После слияния Пянджа с Вахшем река протекает вдоль границы Афганистана с Узбекистаном, проходит по территории Туркменистана, вновь возвращается в Узбекистан и впадает в Аральское море, образуя на подступах к нему огромную дельту шириной до 300 км. В среднем течении в Амударью впадают два крупных правых притока — Кафирниган, Сурхандарья — и один левый — Кундуз. Далее до Аральского моря Амударья не получает ни одного притока, пересекает пустыни и полупустыни, являясь разделительной линией между пустынями Каракумы и Кызылкум, теряет сток на испарение, фильтрацию, водозабор на хозяйственные нужды, в основном на орошение.

Водный режим Амударьи определяется таянием высокогорных снегов, ледников и дождевыми осадками и характеризуется высоким летним и низким зимним стоком. Амударья относится к рекам ледниково-снегового питания, ее средний многолетний сток составляет $73,5 \text{ км}^3$. Основной объем стока (до 85%) формируется из притоков Вахш и Пяндж, на долю Сурхандарьи, Кафирнигана и Кундуза приходится около 15%. Изменчивость годового стока в многолетнем режиме невысока (коэффициент вариации составляет 0,15), но резко выражена неравномерность внутригодового распределения: на апрель — сентябрь приходится 77—80% годового стока, на декабрь — февраль только 10—13%, что в целом благоприятно для развития орошаемого земледелия.

В условиях наблюдаемого в регионе потепления важно оценить, как будут меняться водные ресурсы Амударьи. Данные наблюдений и модельные расчеты показывают устойчивую тенденцию к потеплению в бассейне, уменьшение переходящих запасов снега, деградацию и сокращение горного оледенения [1, 10]. В связи с этим особый интерес представляют оценки вероятности появления экстремальных климатических аномалий и, как следствие, экстремальной водности. Региональные оценки будущих климатических изменений уже показали, что наряду с повышением температуры ожидается увеличение количества осадков, особенно в жидком виде, увеличение частоты и интенсивности экстремальных явлений погоды [9].

Оценивая будущие доступные водные ресурсы, следует принимать во внимание не только ближайшую перспективу (2020—2030 гг.), для которой пока не ожидается существенных изменений, но и более отдаленную. Оценка воздействия изменения климата на водные ресурсы бассейна позволит учитывать возможные изменения гидрологических характеристик при планировании развития сельскохозяйственного и других секторов экономики, а также для разработки адаптационных мероприятий.

Для получения данной оценки решаются следующие основные задачи: разработка региональных климатических сценариев; разработка метода стохастического моделирования стокообразующих факторов (в горных условиях — это осадки и температура) для метеорологических станций зоны формирования стока; имитация продолжительных рядов метеорологических величин по метеостанциям при разных условиях сценария; соответствующие расчеты стока рек в бассейне Амударьи по модели формирования стока горной реки [4] с учетом современного и прогнозируемого оледенения водосбора; статистическая обработка результатов имитационных экспериментов и определение расчетных гидрологических характеристик на основе байесовской идеологии.

3. Климатические сценарии

Региональные климатические сценарии были построены на основе результатов глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана с применением программного средства MAGICC/SCENGEN 4.1 [13], которое позволяет результаты разных моделей преобразовать в узлы единой широтно-долготной сетки. С учетом существующей неопределенности моделирования климата и необходимости построения региональных климатических сценариев с большой достоверностью были выбраны и усреднены результаты шести моделей ведущих мировых климатических центров (HadCM3, Hadley Centre, Великобритания; ECHAM4, Max Planck Institute, Германия; CSIRO-TR, Scientific Industrial Research Organization, Австралия; GFDL-TR, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; CGCM1-TR, Canadian Climate Centre, Канада; CCSR-NIES, Япония). В качестве критерия выбора моделей, наиболее адекватно описывающих климат региона, использовалось отношение сигнала к шуму (отношение ожидаемых изменений в конце столетия к межмодельной изменчивости).

Климатические сценарии строились в соответствии со сценариями эмиссии парниковых газов МГЭИК [10, 12] с учетом влияния сульфатных

аэрозолей. Сценарии характеризуют изменения средних значений к 2030, 2050 и 2080 гг. Анализ полученных результатов в узлах общей широтно-долготной сетки для бассейна р. Амударья показал, что во все сезоны года к концу столетия ожидается значительное потепление; для зимнего сезона возможно некоторое увеличение количества осадков; в весенние и осенние месяцы по территории возможно как их увеличение, так и уменьшение; в летние месяцы ожидается уменьшение осадков.

Детализация климатических сценариев. Для детализации сценариев применен статистический метод регионализации (даунскейлинг), основанный на концепции идеального прогноза [7]. Для этого был создан архив идеальных прогнозов в узлах общей широтно-долготной сетки, включающий осредненные по подсеточной области аномалии среднемесячной температуры воздуха и месячных сумм осадков с 1951 г. до настоящего времени. Для каждой станции и каждого месяца были построены уравнения связи между данными идеальных прогнозов и фактическими значениями температуры и количества осадков по станциям. Эти уравнения использовались для вычисления ожидаемых по сценариям изменений на будущее аномалий температуры воздуха и осадков, предикторами служили результаты моделирования, осредненные по шести выбранным моделям.

Детализированные таким образом климатические сценарии показали, что более интенсивное потепление климата отмечается на низкогорных станциях по сравнению с высокогорными. Например, на станции Гарм (1317 м над уровнем моря) к 2080 г., по экстремальному сценарию A1FI, возможно повышение сезонной температуры воздуха на 5,3—6,0°C, тогда как на станции Ледник Федченко (4169 м над уровнем моря) — на 3,8—4,5°C (табл. 1). Более подробно анализ сценариев и соответствующие выводы изложены в работе [6]. Наблюдаемые в настоящее время темпы потепления в высокогорной и низкогорной зонах, приведенные в работе [8], в целом подтверждают данный вывод.

Таблица 1

Ожидаемые по отдельным сценариям изменения сезонной температуры воздуха относительно норм 1961—1990 гг.

Сезон	Сценарий								
	A1B			B1			A1FI		
	2030 г.	2050 г.	2080 г.	2030 г.	2050 г.	2080 г.	2030 г.	2050 г.	2080 г.
Гарм									
Зима	1,7	2,8	4,3	1,7	2,5	3,3	1,4	2,9	5,4
Весна	1,7	2,9	4,4	1,8	2,6	3,4	1,3	2,8	5,5
Лето	1,8	3,1	4,9	1,9	2,8	3,7	1,4	3,1	6,0
Осень	1,7	2,9	4,3	1,8	2,7	3,5	1,3	2,8	5,3
Ледник Федченко									
Зима	1,2	2,0	3,1	1,2	1,8	2,4	0,9	1,9	3,8
Весна	1,2	2,1	3,2	1,3	1,9	2,5	0,9	2,1	4,0
Лето	1,3	2,3	3,6	1,4	2,1	2,7	1,1	2,3	4,5
Осень	1,3	2,2	3,3	1,3	2,0	2,6	0,9	2,0	3,9

Ожидаемое изменение количества осадков по территории менее однородно, но можно выделить следующие особенности: в зимний период по всем сценариям и временным интервалам возможно небольшое увеличение осадков (на 2—10%); в ближнесрочной (к 2030 г.) и среднесрочной перспективах (к 2050 г.) изменение осадков весеннего, летнего и осеннего сезонов неоднозначно; в долгосрочной перспективе все сценарии дают уменьшение количества осадков (до 16% весной и осенью и до 30% летом); в ближнесрочной перспективе наибольшую аридизацию климата следует ожидать по сценарию A1B; в долгосрочной перспективе (к 2080 г.), согласно всем сценариям, аридизация климата в рассматриваемом горном регионе усилится.

Оценка экстремальных значений температуры и осадков для условий климатических сценариев. С помощью климатических сценариев получена оценка изменений средних значений метеорологических величин за разные временные периоды. Оценки изменений стандартных отклонений показывают для рассматриваемой территории значительное увеличение изменчивости температуры воздуха относительно современного периода.

Изменчивость температуры воздуха и количества осадков в соответствии со сценариями увеличивается, причем чем быстрее темпы потепления, тем больше изменчивость других климатических переменных. Экстремальный сценарий A1FI показывает увеличение изменчивости температуры более чем на 60% к 2080 г., тогда как по умеренному сценарию B1 — на 30%. К 2080 г. возможно также увеличение изменчивости осадков на 10%, что представляет серьезную угрозу в условиях очень большой естественной изменчивости осадков в данном регионе. К 2030 г. увеличение изменчивости температуры воздуха ожидается в пределах 11—16%, увеличение изменчивости осадков незначительно.

Экстремальность климата в будущем могут характеризовать рассчитанные для условий климатических сценариев значения температуры воздуха и сумм осадков заданной вероятности (5, 10, 90 и 95%). При расчете указанных квантилей для температуры воздуха использовалось нормальное распределение с поправкой на асимметрию, поскольку ряды среднемесячной температуры воздуха в рассматриваемом регионе в зимние месяцы характеризуются отрицательной асимметрией. Для месячных сумм осадков была использована кривая Пирсона 3-го типа. В качестве примера на рис. 1 приведены вычисленные значения квантилей распределения сумм осадков и температуры для станции Ледник Федченко.

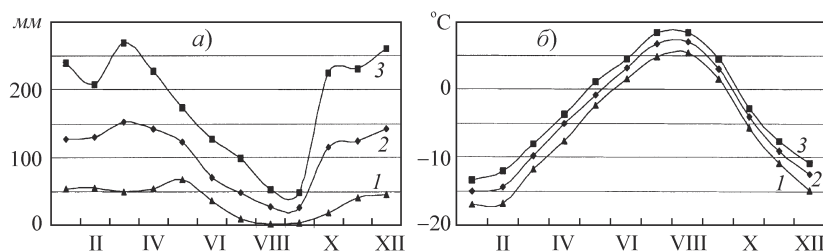


Рис. 1. Рассчитанные значения квантилей 10 (1), 50 (2), 90% (3) месячных сумм осадков (а) и среднемесячной температуры воздуха (б) для условий сценария A1FI, станция Ледник Федченко.

Таким образом, были получены региональные климатические сценарии месячного разрешения, детализированные по территории (температура воздуха по 24 пунктам, осадки по 17 пунктам наблюдений в зоне формирования стока р. Амударья). Помимо оценки изменений средних значений на будущие периоды, рассчитан возможный размах колебаний, что позволило провести моделирование режима стока реки для экстремальных метеорологических условий, ожидаемых в будущем.

4. Стохастическое моделирование искусственной последовательности температуры воздуха и осадков в зоне формирования стока р. Амударья

Для имитационных водохозяйственных расчетов в бассейне Амударьи необходима продолжительная последовательность объемов стока (притоков). Продолжительность рядов притока должна быть не менее нескольких десятков лет, что для верховий Амударьи является трудновыполнимым условием. Для афганской части водосбора имеются лишь отрывочные данные наблюдений (10—15 лет), что вынуждает прибегать к использованию алгоритмов восстановления и имитации искусственных рядов стока.

Для моделирования искусственной годовой последовательности метеорологических величин использовался алгоритм, основанный на разложении полей по естественным ортогональным функциям (ЕОФ) [2, 3]. Моделирующая система использует сведения об осадках на 24 метеостанциях и о температуре на 17 метеостанциях для зоны формирования стока р. Амударья.

При моделировании стока выполнена статистическая обработка метеорологических данных наблюдений за условно репрезентативный период, заключающаяся в вычислении параметров распределений сумм осадков и среднемесячной температуры воздуха для каждого месяца, матриц коэффициентов парной корреляции сумм осадков за месяц и среднемесячной температуры также для каждого месяца, автокорреляционных функций осадков и температуры.

Оценки моментов параметров распределений показали, что для моделирования среднемесячной температуры приемлем нормальный закон распределения, а для осадков — трехпараметрическое гамма-распределение.

Анализ автокорреляционных функций показал, что в качестве модели временного ряда можно выбрать процесс авторегрессии первого порядка (как для осадков, так и для температуры) с удаленным сезонным ходом. В частности, коэффициент автокорреляции последовательности месячных сумм осадков составил 0,1, а для среднемесячной температуры — 0,3.

Окончательно выбрана следующая схема моделирования искусственной последовательности количества осадков и температуры воздуха. Для матрицы коэффициентов парной корреляции полей осадков и температуры вычисляются собственные функции и коэффициенты разложения по ним. Для 17 метеостанций моделируется последовательность нормально распределенных чисел с нулевым средним и единичной дисперсией. Далее, умножая полученные числа на среднеквадратическое отклонение температуры для каждого месяца и для каждой метеостанции и прибавляя среднее значение температуры для каждого месяца, получаем искусственные ряды

Таблица 2

Фрагмент корреляционной матрицы поля среднемесячных сумм осадков

Станция	Гарм	Гульча	Гушари	Ховалинг	Ледник Федченко	Тавильдара
Гарм	1,00	0,50	0,72	0,63	0,54	0,77
Гульча		1,00	0,42	0,40	0,56	0,46
Гушари			1,00	0,66	0,45	0,64
Ховалинг				1,00	0,43	0,68
Ледник Федченко					1,00	0,52
Тавильдара						1,00

среднемесячных значений температуры воздуха, характеризующиеся заданной матрицей парных корреляций.

Для моделирования осадков в описанную процедуру добавляется блок нормализации. После моделирования нормализованных значений для 24 метеостанций осуществляется переход к гамма-распределенным величинам с помощью таблиц распределения С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля и параметров распределений месячных сумм осадков. В табл. 2 приведен в качестве примера фрагмент корреляционной матрицы поля месячных сумм осадков для шести метеорологических станций.

Описанный алгоритм использовался для моделирования искусственных реализаций полей осадков и температуры воздуха в условиях климатических изменений. Корреляционная структура полей сохранялась такой же, как и при современном климате, но параметры одномерных распределений изменялись в соответствии с результатами расчетов, полученных в результате проведения процедуры даунскейлинга для выходных результатов глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана.

Располагая последовательностью значений количества осадков и температуры, а также сведениями о состоянии оледенения (современные и прогностические оценки), с использованием моделей формирования стока можно осуществить расчет водности реки и получить гидрологический ряд необходимой длины.

5. Модель формирования стока горных рек

В качестве методического подхода для расчета стока Амударьи использована региональная математическая модель формирования стока, позволяющая оценить роль и вклад разных источников питания в сток реки [4]. Модель относится к классу моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами и состоит из следующих крупных блоков: модели поступления воды на поверхность горного бассейна, модели стока с ледников и модели трансформации гидрографа поступления воды на водосбор в сток реки в замыкающем створе. В модели поступления рассчитывается количество осадков для каждой высоты в любой момент времени, определяется вид осадков (снег или дождь) и как субмодель в нее входит модель формирования и таяния снежного покрова. На каждый момент времени рассчитывается интегральное количество жидких осадков, выпавших на

поверхность, интегральное количество талой воды от таяния снега и талой воды ледников.

Нелинейная двухобъемная модель трансформации представляет бассейн из двух емкостей, действие которых описывается следующими балансовыми уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= Q_i - Q_E - Q_1 - R_1, \\ \frac{dW_2}{dt} &= R_1 - Q_2 - R_2.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь W_1 и W_2 — запас воды в верхней и нижней емкостях соответственно; Q_i — поступление талой и дождевой воды на поверхность бассейна. Расходы из емкостей определяются следующими соотношениями:

$$Q_1 = c_1 W_1^2; R_1 = c_{1,2} W_1; Q_2 = c_2 W_2; R_2 = c_{2,3} W_2,$$

где $c_1, c_{1,2}, c_2, c_{2,3}$ — параметры модели. Потери на испарение Q_E могут быть учтены совместно с R_1 , если считать их пропорциональными запасу воды в W_1 . Однако возможен и дифференцированный учет потерь на испарение. Можно предположить испарение пропорциональным запасу воды в верхней емкости и дефициту влажности воздуха, среднему по площади бассейна, свободного от снега. Испарением с поверхности снега можно пренебречь. Тогда для расчета Q_E можно принять выражение:

$$Q_E = \lambda \frac{W_1}{F_{\text{bas}}} \int_{z_{\min}}^{\bar{z}} D(z, t) \frac{dF(z)}{dz} dz, \quad (2)$$

где $D(z, t)$ — дефицит влажности на высоте z в момент времени t ; λ — параметр.

Система балансовых уравнений (1) после подстановки соотношений расходов из емкостей и объемов, сводится к системе двух дифференциальных уравнений относительно Q_1 и Q_2 с четырьмя неизвестными параметрами, которые определяются методом оптимизации.

Полученные результаты тестирования модели на ряде бассейнов горных рек позволяют использовать модель в разных гидрологических задачах: в анализе количества осадков, снегонакопления, таяния снега, в восстановлении пропусков наблюдений за стоком и др. С учетом высокой тесноты связи рассчитанного по модели снегонакопления со стоком вегетационного периода основное применение модель нашла в области гидрологических прогнозов и расчетов, позволяющих принять к сведению возможные климатические изменения путем сценарного задания метеовеличин и прогностических оценок оледенения.

6. Байесовские оценки характеристик стока

Задачи надежного водообеспечения требуют достоверных оценок водных ресурсов и научно обоснованных прогнозов последствий воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, в частности водную. Методы решения гидрологических и водохозяйственных задач регламентируются рядом нормативных документов [5]. Однако в современных условиях возникает необходимость рассмотрения подходов, которые, раз-

вывая идеологию существующих нормативов, позволяют получать более надежные оценки водных ресурсов. В частности, применительно к нестационарным условиям решить некоторые задачи можно путем использования байесовских методов оценивания и прогнозирования. Необходимость применения байесовских методов вызвана как минимум двумя причинами. Во-первых, характеристики стока желательно уточнить по информации территориального характера, т. е. привлечь сведения об объектах-аналогах в пределах однородного района. Вторая причина — это необходимость получения оценок в нестационарном случае, когда наблюдается существенно разная изменчивость процесса речного стока при разных условиях сценария и прогноз характеризуется большой неопределенностью.

Распределение вероятности стока рек, как правило, характеризуется положительной асимметрией и описывается двух- или трехпараметрическим гамма-распределением. В данном исследовании ограничимся двухпараметрическим гамма-распределением в следующем виде:

$$P(x_0, \gamma, x) = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\gamma-1} e^{-\gamma(x/x_0)}, \quad (3)$$

где x_0 — среднее значение; $\gamma = 1/C_v^2$, C_v — коэффициент вариации, $\Gamma(\gamma)$ — гамма-функция.

Следующий шаг состоит в вычислении прогностической функции распределения стока на основе формулы полной вероятности. В этом случае прогностическая плотность оценивается в виде

$$\pi(x) = \int_{\theta} P(x, \theta) p(\theta/x) d\theta, \quad (4)$$

где $p(\theta/x)$ — апостериорное распределение вероятностей параметра θ ; $P(x, \theta)$ — двухпараметрическое гамма-распределение с известным параметром γ . В результате численного интегрирования (4) получим прогностическое байесовское распределение вероятности исследуемой стоковой характеристики.

В данном случае далее будут рассмотрены три состояния прогнозируемого процесса, и можно предположить, что система с вероятностями n_1/N , n_2/N и n_3/N может находиться в одном из них. При этом $n_1 + n_2 + n_3 = N$, где N является суммой всех шансов. В этом случае распределение оценки среднего будет являться комбинацией трех распределений:

$$\tilde{p}(\theta/x) = \frac{n_1}{N} \eta_1(\theta, x) + \frac{n_2}{N} \eta_2(\theta, x) + \frac{n_3}{N} \eta_3(\theta, x), \quad (5)$$

где $\eta_i(\theta, x)$ — выборочное распределение среднего значения для i -го сценария с весом n_i ; $\tilde{p}(\theta/x)$ — апостериорное распределение оценки θ для прогнозируемых климатических условий.

Окончательный этап байесовского оценивания (прогнозирования) состоит в вычислении прогностического распределения на основе формулы полной вероятности. В этом случае комбинация распределений (5) будет являться апостериорной плотностью, а модельное распределение — двухпараметрическим гамма-распределением (1) с параметром γ , принимаемым одинаковым для всех сценариев:

Таблица 3

**Квантили распределения годового стока рек Вахш и Амударья
для прогнозов на перспективу 30 и 50 лет**

Период прогнози- рования, годы	Веса для сценариев, %			Вероятность превышения, %				
	современ- ный климат	сценарий		50	75	90	95	97
		A1B	B1					
р. Вахш — п. Комсомолабад								
30	50	25	25	560	510	468	444	429
50	50	25	25	539	479	431	407	392
р. Амударья — п. Керки								
30	50	25	25	1860	1730	1610	1550	1500
50	50	25	25	1800	1644	1516	1440	1400

$$\pi(y) = \int_{\theta} P(y, \gamma, \theta) \tilde{p}(\theta/x) d\theta. \quad (6)$$

Получаемое распределение уже не будет гамма-распределением и вычисляется путем численного интегрирования уравнения (6).

Для гидрологических расчетов в данной работе анализировались четыре сценария, каждому из них придан вес 1/4. Для моделирования стока Амударьи детально исследовались два из них (A150, B150), так как они приводят к наихудшим гидрологическим результатам по сравнению с современным климатом. Остальные сценарии приводят к значениям водности, не сильно отличающимся от тех, которые характерны для современного климата. В табл. 3 и на рис. 2 представлены результаты расчетов для двух водосборов: р. Вахш — п. Комсомолабад и р. Амударья — п. Керки.

7. Заключение

Реакция зоны формирования стока р. Амударья на происходящее глобальное потепление климата неоднозначна, что связано со сложным рельефом рассматриваемой территории, где выделяются горные и высокогорные районы с обширными областями оледенения. На фоне общей тенденции к потеплению за прошедшие полвека темпы потепления по высотным зонам и районам различаются, а по данным отдельных станций практически отсутствуют. В целом с увеличением высоты места прослеживается замедление темпов потепления. Режим выпадения осадков характеризуется большой изменчивостью во времени и пространстве, а также неоднозначными долговременными тенденциями изменений.

Для уменьшения неопределенности оценки климатических изменений на будущие периоды и учета региональных особенностей при построении климатических сценариев в данной работе применили мультимодельный подход и статистический метод даунскейлинга для использования результатов глобальных климатических моделей. Выбранный подход позволил оценить будущий климатический режим для станций, имеющих достаточно длительные и однородные ряды наблюдений. Однако рассматриваемая

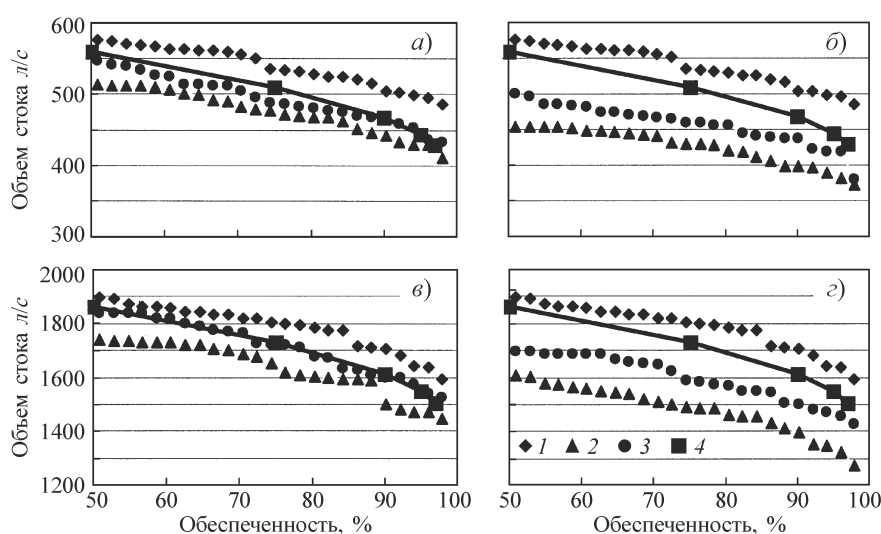


Рис. 2. Усеченные кривые обеспеченности стока для разных климатических сценариев для рек Вахш — п. Комсомолабад (а, б) и Амударья — п. Керки (в, з) при периодах прогнозирования 30 (а, в) и 50 лет (б, з).

1 — современный климат; 2 — сценарий B150; 3 — сценарий A150; 4 — байесовская оценка.

территория, особенно в последнее десятилетие, характеризуется очень малой освещенностью и не всегда удовлетворительным качеством данных наблюдений. В связи с этим потребовались дополнительная интерполяция и обработка данных, являющихся входными для моделирования стока.

Результаты расчета стока, полученные в рамках региональной гидрологической модели при реализации региональных климатических сценариев, показали, что в среднесрочной и долгосрочной перспективе ожидается уменьшение стока р. Амударья. Эти оценки согласуются с расчетами Манабе и Везельрода (1980 г.) [11], согласно которым при увеличении содержания CO_2 в атмосфере в два раза на материках в широтном поясе $40\text{--}50^\circ$ с. ожидается существенное уменьшение речного стока и влажности почвы.

Как результат применения байесовской идеологии, на основе расчетов по формуле полной вероятности получена прогностическая кривая обеспеченности годового стока рек, основывающаяся на назначении разных весов оценкам среднего для разных климатических сценариев. Использование теоремы Байеса позволило оценить прогностические характеристики годового стока для рек бассейна Амударьи в форме, приемлемой для гидрологических и водохозяйственных приложений.

Литература

1. **Агальцева Н. А., Пак А. В.** Оценка влияния климатических изменений на водные ресурсы рек бассейна Аральского моря. /В сб.: Климатические сценарии, оценка воздействий изменения климата. Бюллетень № 6. — Ташкент, НИГМИ, 2007, с. 44—51.
2. **Багров Н. А.** Аналитическое представление последовательностей метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. — Труды ЦИП, 1959, вып. 74, с. 3—27.
3. **Болгов М. В., Сарманов И. О., Сарманов О. В.** Марковские процессы в гидрологии. — М., Изд-во ИВП РАН, 2009, 210 с.
4. **Денисов Ю. М., Агальцева Н. А., Пак А. В.** Автоматизированные методы прогнозов стока горных рек Средней Азии. — Ташкент, САНИГМИ, 2000, 160 с.
5. **Свод правил по проектированию и строительству.** СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М., Госстрой России, 2003, 73 с.
6. **Спекторман Т. Ю.** Выбор сценариев для проведения оценки воздействия изменения климата в Узбекистане. /В сб.: Климатические сценарии, оценка воздействий изменения климата. Бюллетень № 6. — Ташкент, 2007, с. 22—27.
7. **Спекторман Т. Ю.** Методика построения сценария изменения климата по территории Узбекистана с использованием концепции “идеального прогноза”. /В сб.: Оценка изменений климата по территории Республики Узбекистан, развитие методических положений оценки уязвимости природной среды. Бюллетень № 5. — Ташкент, САНИГМИ, 2002, с. 83—88.
8. **Финаев А. Ф.** Анализ гидрометеорологических наблюдений в Таджикистане за период 1990—2005 гг. /В сб.: Снежно-ледовые и водные ресурсы высоких гор. Материалы Международного семинара “Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии”. — Алматы, Казахстан, 2007, с. 129—138.
9. **Чуб В. Е.** Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы Республики Узбекистан. — Ташкент, 2007, 132 с.
10. **Climate Change 2007.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Published by the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, et al. (eds.). — Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2007.
11. **Manabe S. and Wetherald R.** On the Distribution of Climate Change Resulting from an Increase in CO₂ Content of the Atmosphere. — J. Atmos. Sci., 1980, vol. 37, pp. 99—118.
12. **Parry M.** Scenarios for climate impact and adaptation assessment. — Global Environmental Change, October 2002, vol. 12, No. 2.
13. **Wigley T. M. L.** MAGICC/SCENGEN 4.1. — Technical Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003.

Поступила
19 VIII 2010

ESTIMATING HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE AMU DARYA RIVER BASIN UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

N. A. Agal'tseva, M. V. Bolgov, T. Yu. Spektorman, M. D. Trubetskova, and V. E. Chub

The results of the solution of the river water content problem under conditions of uncertainty in climate change forecasts and catchment state are considered for the Amu Darya River taken as an example. To construct the regional climatic models, the multi-model approach using the results of several climatic models and statistics “downscaling” method detailing the climatic scenarios were chosen. The computations demonstrate that the Amu Darya River runoff reduction is expected in the medium- and long-range prospects. The prognostic probability curve of the annual river runoff based on the different weights given to the estimates of average values for different climatic scenarios is obtained as a result of the Bayesian ideology application. The prognostic annual river runoff characteristics for the Amu Darya basin are estimated in the acceptable form for hydrological and hydroeconomic applications.