

Гидравлика, гидрология, водные ресурсы

УДК 502/504:556.048

М. В. ВОЛГОВ, М. Д. ТРУБЕЦКОВА

Институт водных проблем РАН

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА СТОКА РЕКИ АМУДАРЬИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Рассмотрен подход к учету неопределенности климатических сценариев при построении региональных оценок водных ресурсов в условиях нестационарного климата. Предложено составлять прогноз их будущего состояния в вероятностной форме, на основе байесовского критерия, с учетом шансов реализации того или иного сценария. На основе расчетов по формуле полной вероятности получена прогнозная кривая обеспеченности годового стока рек.

Байесовский критерий для оценки стока, кривая обеспеченности стока, неопределенность климатических сценариев, зональный сток, метод регуляризации, функция распределения стока, Центрально-Азиатский регион, Амударья.

There is considered an approach to the consideration of the climatic scenario uncertainty when building regional estimations of water resources under the conditions of an unsteady climate. It is proposed to make a prognosis of their future condition in a probabilistic form, on the basis of the Bayesian approach taking into account chances of realization of one or another scenario. On the basis of calculations according to the formula of total probability there is received a forecast curvature of the annual probability of rivers flow.

Bayesian criteria for flow assessment, flow probability curvature, uncertainty of climatic scenarios, zonal flow, method of regulation, flow distribution function, the Cenral Asian region, Amu Darya.

О неопределенности оценок климатических изменений. Современное потепление глобального климата имеет как естественно-инерционную, так и антропогенно-обусловленную составляющие. Поскольку точность моделей глобальной циркуляции атмосферы недостаточна, а неопределенность долгосрочных прогнозов все еще весьма велика, лишь с определенной долей вероятности можно утверждать, что преобладает антропогенная составляющая потепления. В моделях глобальной циркуляции недостаточно проработаны целые блоки, например блоки, отвечающие за биологические механизмы регуляции климата. Гидрологический цикл в моделях общей циркуляции реализован весьма упрощенно.

Параметры моделей глобальной циркуляции в значительной мере определены подбором, что вместе с эмпирическим характером учета многих внутренних связей и подсчетных эффектов также определяет лишь некоторую степень вероятности преобладающей роли механизмов эмиссии CO_2 в потеплении климата. В связи со сказанным справедлив вывод о том, что модели, верифицированные на данных, характеризующих современные климатические условия, лишь косвенно отражают эффект дополнительной эмиссии CO_2 .

Использование результатов расчетов по верифицированным моделям глобальной циркуляции с увеличенным (сценар-

ным) содержанием CO_2 в атмосфере в качестве сценариев будущих изменений климата представляется возможным. Однако при этом вероятности реализации сценариев вряд ли могут быть надежно определены по частотам встречаемости таких концентраций CO_2 в прошлом, вычисленным, например, по палеореконструкциям климата. Несовершенство моделей приводит к значительным ошибкам и в реконструируемых данных. К тому же такие данные весьма ограниченные, и переносить, например, данные, полученные путем обработки ледникового керна, из Антарктиды в Центрально-Азиатский регион, можно лишь с большой долей условности.

Необходимо отметить, что региональные климатические характеристики воспроизводятся моделями общей циркуляции значительно хуже, чем глобальные параметры. Можно ли модельные выводы о глобальном изменении климата переносить на региональный уровень? Это вопрос, который требует учета множества факторов неопределенности модельных представлений. Существующие модели, выпускающие «в свет» различные сценарии будущих изменений, отличаются как входными параметрами относительно эмиссии CO_2 , так и особенностями самих моделей. Среди многих решений на региональном уровне, как правило, отбирается несколько сценариев, принимаемых, по мнению специалистов, в качестве наиболее вероятных (идеология IPCC).

С точки зрения приложений возникает важнейший вопрос – как учесть эту неопределенность при выработке практических рекомендаций? В самом простейшем случае можно ориентироваться на климатические сценарии, приводящие к самым худшим гидрологическим или агрометеорологическим прогнозам. При этом нельзя утверждать, что исключен еще более плохой сценарий.

В то же время решение практических задач, связанных с использованием водных ресурсов, требует вероятностного прогноза их состояния. Дать вероятностную оценку только одному, экстремальному, сценарию весьма сложно. Необходимо каким-то образом оценить шансы реализации в будущем всех рассматриваемых сценариев и разработать для приложений прогноз на основе использования сведений

о шансах всех «разумных» сценариев. В таком случае представляется возможным дать прогноз будущего состояния водных ресурсов в вероятностной форме и избежать очень грубых просчетов, вполне возможных при реализации только одного, пусть и самого плохого, сценария. К тому же, при ориентации на самый худший вариант невозможно дать оценку риску возникновения катастрофических ситуаций в водном хозяйстве. Как известно, риск – это математическое ожидание ущерба, а при отсутствии вероятностного прогноза экстремальных гидрологических характеристик вычислить математическое ожидание не представляется возможным.

Принятые научным сообществом сценарии изменения климата, вероятно, не охватывают всех возможных «исходов» ввиду ограниченности наших знаний. Мы представляем себе, что используемые модели (метеорологические, океанологические, гидрологические, биологические и пр.) несовершенны, но мы не можем предсказать, каковы будут эффекты при дальнейшем их развитии.

Представляющий практическую ценность научный прогноз сложных, слабо изученных явлений должен основываться на учете многообразия существующих современных представлений и многовариантности прогнозов глобального развития. Получить такие прогнозные оценки можно, например, на основе байесовского подхода с учетом шансов реализации того или иного сценария. Основная сложность – оценка шансов или вероятностей реализации этих сценариев. Речь идет о попытках распределить шансы между прогнозами, характеризующимися большой неопределенностью. Если сценарии, принятые научным сообществом, не имеют явных предпочтений друг перед другом, то в первом приближении можно принять, что их шансы реализоваться в будущем равны, а различия между ними могут быть учтены, например, путем введения распределения погрешностей верификации или других ошибок моделирования.

На примере бассейна реки Амударьи решалась задача оценки минимальной водности рек в условиях значительной неопределенности прогнозов изменений климата и состояния водосбора. Последнее для данного бассейна весьма важно,

так как значительная часть стока формируется за счет таяния ледников, современное же оледенение в Центрально-Азиатском регионе характеризуется существенной скоростью деградации.

Из упомянутых результатов рассмотрены оценки стока рек в условиях деградации оледенения на основе решения задачи о поясном (зональном) стоке и метод прогноза водности рек, учитывающие неопределенность климатических изменений на основе байесовского подхода.

О зональном стоке в бассейне реки Амударьи. Авторами была предпринята попытка оценки влияния сокращения площади ледников на речной сток методом исследования величин зонального стока (местного стока, поступающего с определенной высотной зоны). Определение величин зонального стока путем решения некорректно поставленной обратной задачи изложено в [1].

Сток, измеряемый на водомерном посту, можно представить как сумму величин стока, поступающего с нескольких высотных зон:

$$Y = \sum_{i=1}^n f_i y_i,$$

где f_i – относительная площадь i -й высотной зоны; y_i – величина зонального стока (стока с i -й высотной зоны); n – номер высотной зоны, выделенной на водосборе.

Если мы имеем данные измерений стока на m гидрологических станциях в однородном гидрологическом районе, внутри которого величины зонального стока не изменяются (зависят только от высоты), то можно записать систему

линейных уравнений:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^{n_1} f_{1,i} y_i;$$

$$Y_2 = \sum_{i=1}^{n_2} f_{2,i} y_i;$$

.....

$$Y_m = \sum_{i=1}^{n_m} f_{m,i} y_i,$$

где 1, 2, ..., m – номера водомерных постов.

В матричном виде:

$$Y = Ay, \tag{1}$$

где A – матрица с элементами $f_{i,j}$.

Решение системы уравнений (1) и даст величины зонального стока. Чтобы решить систему уравнений (1), был применен метод регуляризации А. Н. Тихонова для решения некорректно поставленных задач [2].

В настоящее время практически во всех горных районах Земли наблюдается сокращение площади оледенения, однако скорость отступления ледников непостоянна [3]. Согласно исследованиям, в западной и центральной частях Памиро-Алая в период с 50-х до начала 70-х годов прошлого века изменение границ ледников было несущественным, в начале же 70-х началось более активное сокращение площади оледенения в этом регионе [3]. Для территории бассейна Верхней Амударьи авторами были вычислены значения зональных модулей стока и произведено районирование по принципу зависимости зонального модуля стока от высоты (рис. 1).



Рис. 1. Районирование верхней части бассейна Амударьи по характеру распределения величин зональных модулей стока (цифрами обозначены номера районов)

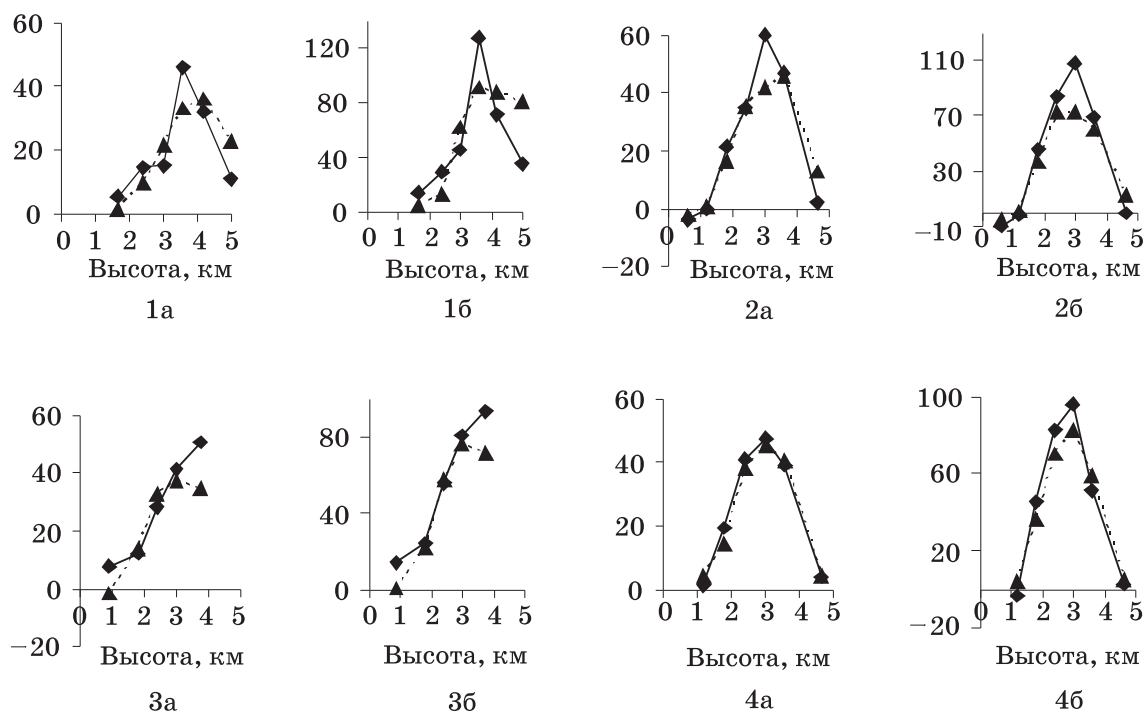


Рис. 2. Величины поясного стока: 1а...4б – районы; ◆ – за период до 1970 года; ▲ – за период после 1970 года; 1а, 2а, 3а, 4а – среднегодовые значения; 1б, 2б, 3б, 4б – средние значения за половодье

Были использованы данные наблюдений на 36 гидрологических постах (среднемесячные расходы воды); продолжительность наблюдений для наиболее короткого ряда составила 27 лет.

На рис. 2 приведены вычисленные среднегодовые и средние за период максимальной водности величины зонального стока за период до 1970 года и после 1970 года для районов 1...4.

Полученные результаты решения обратной задачи показывают, как изменяется водоносность рек на различных высотах бассейна (см. рис. 2). Существенно понизились величины модулей стока, приуроченные к высотам 3...4 км, где они максимальные, особенно ярко это проявилось в период максимальной водности. Величины зонального стока в верхних высотных диапазонах (3,6...4 км), напротив, несколько увеличились, что, очевидно, связано с более интенсивными процессами таяния ледников в период после 1970 года 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.

Байесовские оценки характеристик стока. Необходимость применения байесовского метода вызвана как минимум двумя причинами. Первая причина – характеристики стока желательно уточнить за счет информации территориального характера, т.е. привлечь сведения об объектах-аналогах в пределах однородного района. Вторая причина – это необходимость получения расчетных оценок в нестационарном случае, когда наблюдается существенно разное поведение речного стока для различных сценарных условий и прогноз характеризуется большой неопределенностью.

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

$$P(x_0, \gamma, x) = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma-1} e^{-\frac{\gamma x}{x_0}}, \quad (2)$$

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

Следующий шаг состоит в вычислении прогнозной функции распределения стока на основе формулы полной вероятности. В этом случае прогнозная плотность

оценивается так:

$$\pi(x) = \int_{\theta} P(x, \theta) \cdot p(\theta / x) d\theta, \quad (3)$$

где $p(\theta/x)$ – апостериорное распределение вероятностей параметра θ ; $P(\theta, x)$ – двухпараметрическое гамма-распределение с известным параметром γ .

В результате численного интегрирования (3) мы получим байесовское прогнозное распределение вероятностей исследуемой стоковой характеристики.

В нашем случае далее будут рассмотрены три состояния прогнозируемого процесса, и мы можем 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 подобном случае распределение оценки среднего будет являться комбинацией трех распределений:

$$\begin{aligned} \tilde{p}(\theta / x) = & \frac{n_1}{N} \cdot \eta_1(\theta, x) + \frac{n_2}{N} \eta_2(\theta / x) + \\ & + \frac{n_3}{N} \eta_3(\theta / x), \end{aligned} \quad (4)$$

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

Окончательный этап байесовской оценки (прогнозирования) состоит в вычислении прогнозного распределения на основе формулы полной вероятности.

В этом случае комбинация распределений (4) будет являться апостериорной плотностью, а модельное распределение – двухпараметрическим гамма-распределением (2) с параметром γ , принимаемым одинаковым для всех сценариев:

$$\pi(y) = \int_{\theta} P(y, \gamma, \theta) \cdot \tilde{p}(\theta / x) d\theta. \quad (5)$$

Прогнозное распределение уже не будет гамма-распределением, оно получается путем численного интегрирования уравнения (5).

Как уже отмечалось, в Центрально-Азиатском регионе климатологами используется несколько наиболее реалистичных сценариев будущих климатических изменений. Два из них, задействованные в настоящем проекте, привели к наихудшим гидрологическим результатам по сравнению с современным климатом, соответственно каждому из них придан вес 1/4. Значения водности в остальных двух сценариях незначительно отличаются от тех, которые характерны для современного климата, поэтому параметрам распределения стока, рассчитанным за репрезентативный период, придан вес 1/2. В таблице можно увидеть результаты расчетов по формуле (5) для водосбора «Река Вахш – поселок Комсомолабад».

Функция распределения годового стока для водосбора «Река Вахш – поселок Комсомолабад»

Период прогноза	Вес для сценария, %			Вероятность превышения, %				
	Современный климат	Сценарий А1	Сценарий В1	50	75	90	95	97
30 лет	50	25	25	560	510	468	444	429
50 лет	50	25	25	539	479	431	407	392

Выводы

Как результат приложения метода Байеса, на основе расчетов по формуле полной вероятности получена прогнозная кривая обеспеченности годового стока рек, основанная на соответствии различных весов оценкам среднего значения для различных климатических сценариев. Использование теоремы Байеса позволило оценить прогнозные характеристики годового стока для рек бассейна Амударьи в форме, приемлемой для гидрологических и водохозяйственных приложений, и оценить надежность систем водоснабжения в регионе.

1. **Болгов М. В.** Дождевые паводки на водотоках МНР // Метеорология и гидрология. – 1985. – № 6. – С. 51–57.

2. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974. – 222 с.

3. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Под ред. В. М. Котлякова. – М.: Наука, 2006. – 483 с.

Материал поступил в редакцию 20.03.10.

Болгов Михаил Васильевич, доктор технических наук

Тел. 8 (499) 783-38-09

E-mail: bolgovmv@mail.ru

Трубецкова Марина Дмитриевна, младший научный сотрудник

E-mail: trubets@mail.ru