

ГИДРОЛОГИЯ**А. Хамлили****ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕГО
ГОДОВОГО СТОКА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ
ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ****A. Hamlili****ESTIMATION OF LONG-TERM VARIATIONS
IN THE STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE MULTI-YEAR
ANNUAL RUNOFF IN NORTH-WEST AFRICA
DUE TO CLIMATE CHANGE**

Рассматривается возможность применения стохастической модели формирования многолетнего годового стока для прогнозирования долгосрочных изменений расчетных гидрологических характеристик речных бассейнов Северо-Западной Африки. Наряду с моделью с мультипликативными шумами использована также модель с аддитивными шумами, предложенная профессором В.В. Коваленко для обеспечения устойчивости прогнозных оценок начальных моментов. Проведена сравнительная оценка результатов, полученных по обеим моделям.

Ключевые слова: климатические сценарии, многолетний сток, прогнозирование, устойчивость, Северо-Западная Африка

The opportunity of application of stochastic model of formation of a long-term annual drain for forecasting long-term changes of the settlement hydrological characteristics of river pools of North-West Africa is considered. Alongside with model with multiplicate noise the model with additive noise offered by the professor V.V. Kovalenko for maintenance of stability прогнозных of estimations of the initial moments is used also. The comparative estimation of results received on both models is carried out.

Key words: the climatic scripts, long-term flow, forecasting, stability, North-West Africa.

Климатические сценарии

Имеющиеся натурные наблюдения за приземной температурой воздуха явно указывают на потепление климата (споры между учеными ведутся только о его причинах). Это, в свою очередь, ставит задачу по оценке долгосрочных последствий подобных изменений на речной сток, от которого зависит жизнеобеспечение почти всех отраслей экономики, а также экология.

Имеются многочисленные климатические сценарии (на текущий момент их около пятидесяти только в открытом доступе Интернет, см. сайт

<http://www.ipcc-data.org>). Они отражают различные гипотетические варианты социально-экономического развития мирового сообщества [6]. Среди них можно выбрать наиболее ожидаемый, которым рекомендуется пользоваться при решении задач, связанных с использованием водных ресурсов. Он характеризуется медленным ростом численности населения на Земле и развитием новых технологий, что приводит к постоянству концентрации парниковых газов.

В любом сценарии даются распределения температур воздуха и осадков по двадцатилеткам на ближайшие девяносто лет. Обычно они связываются с потеплением, но для излагаемой ниже методологии прогнозирования это обстоятельство не важно, сценарий может быть и на похолодание.

Вероятностные модели формирования стока и их адаптация к условиям Северо-Западной Африки

В достаточно общем виде модель формирования вероятностных характеристик многолетнего стока представляется уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial[A(Q,t)p(Q,t)]}{\partial Q} + 0,5 \frac{\partial^2[B(Q,t)p(Q,t)]}{\partial Q^2}, \quad (1)$$

где $p(Q)$ – плотность вероятности расхода воды; A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяющие скорость изменения математического ожидания приращений расходов и их квадратов соответственно.

Применение модели (1) для решения гидрологических задач подробно излагается в учебнике [2]. В науке известны методы, позволяющие аппроксимировать модель (1) системой уравнений для начальных моментов m_i ($i = \overline{1,4}$), которые и применяют в инженерной гидрологии [5]:

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}\tilde{N}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\bar{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$; $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ (здесь k – коэффициент стока; τ – время релаксации речного бассейна; \dot{X} – интенсивность осадков; \bar{c} и \bar{N} – математические ожидания; \tilde{c} и \tilde{N} – белые шумы с интенсивностями $G_{\bar{c}}$ и $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\bar{c}\tilde{N}}$).

Хотя система (2) значительно проще, чем уравнение (1), но и ее применение для условий Африки проблематично, так как ряды наблюдений в несколько десятилетий не позволяют использовать моменты выше третьего порядка (по-

следний определяет коэффициенты асимметрии). Если же коэффициент асимметрии C_s использовать, связывая его фиксированным соотношением с коэффициентом вариации C_v (C_s/C_v), то система (2) сводится к первым двум уравнениям (с уменьшенным числом задаваемых параметров).

Расчеты выполнялись по двум вариантам модели: 1) $m_3 = 0$, $m_4 = 0$, $G_{\bar{c}} \neq 0$, $G_{\bar{c}\bar{N}} = 0$, $G_{\bar{N}} \neq 0$, $\bar{N} = \dot{X} / \tau$, $\bar{c} = 1 / k\tau$, $\tau = 1$; 2) $m_3 = 0$, $m_4 = 0$, $G_{\bar{c}} \neq 0$, $G_{\bar{c}\bar{N}} = 0$, $\bar{c} = 1$, $\bar{N} = k\dot{X} / \tau$, $G_{\bar{N}} \neq 0$, $\tau = 1$. В обоих случаях окончательное значение коэффициента асимметрии находилось с использованием соответствующего на текущий момент соотношения C_s/C_v , но при прогнозном значении C_v .

Во втором варианте расчета (в бассейн подаются эффективные осадки) система (2) сводится к двум уравнениям:

$$dm_1/dt = -(1 - 0,5\beta)m_1 + \bar{N}; \quad (3)$$

$$dm_2/dt = -2(1 - \beta)m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}}, \quad (4)$$

где (напомним) $\bar{N} = k\dot{X} / \tau$ ($\tau = 1$), а $\beta = G_{\bar{c}} / \bar{c}$ ($\bar{c} = 1$).

Параметр β является критерием устойчивости решений модели и для его выполнения в данном случае служит формула

$$\beta = 2 \ln r + 2, \quad (5)$$

где r – коэффициент автокорреляции ряда годового стока.

Прогнозные карты и их сравнительная оценка

Прогнозы выполнялись для квазистационарного ($dm_1/dt = dm_2/dt = 0$) периода 2040–2069 гг. по сценарию СОММИТ. Коэффициенты стока k в прогнозном периоде задавались с использованием формулы Тюрка по связи $k = f(\dot{X}, T \text{ } ^\circ\text{C})$ (здесь \dot{X} и $T \text{ } ^\circ\text{C}$ – осадки и температура приземного воздуха из климатического сценария). Для примера на рис. 1 приведены фактические и прогнозные (по двум вариантам модели) карты коэффициентов вариации и зон аномалий (т. е. существенных, больше погрешностей вычислений, равных примерно 15 %, отклонений прогнозных значений от фактических).

Как видно из этого рисунка, оба варианта дают качественно похожую картину, но (см. рис. 1, а и 1, б) первый вариант дает более существенные отклонения – аномалии – прогнозных значений от фактических).

Оценка устойчивости прогнозных карт выполненная по критерию β (использовалась методика, приведенная в учебнике [2] и примененная в диссертации М. Н. Громовой [1]), показала, что второй вариант модели, когда коэффициент стока вводится в аддитивный член («внешнее воздействие»), дает устойчивые решения по всем моментам на всей территории Северо-Западной Африки.

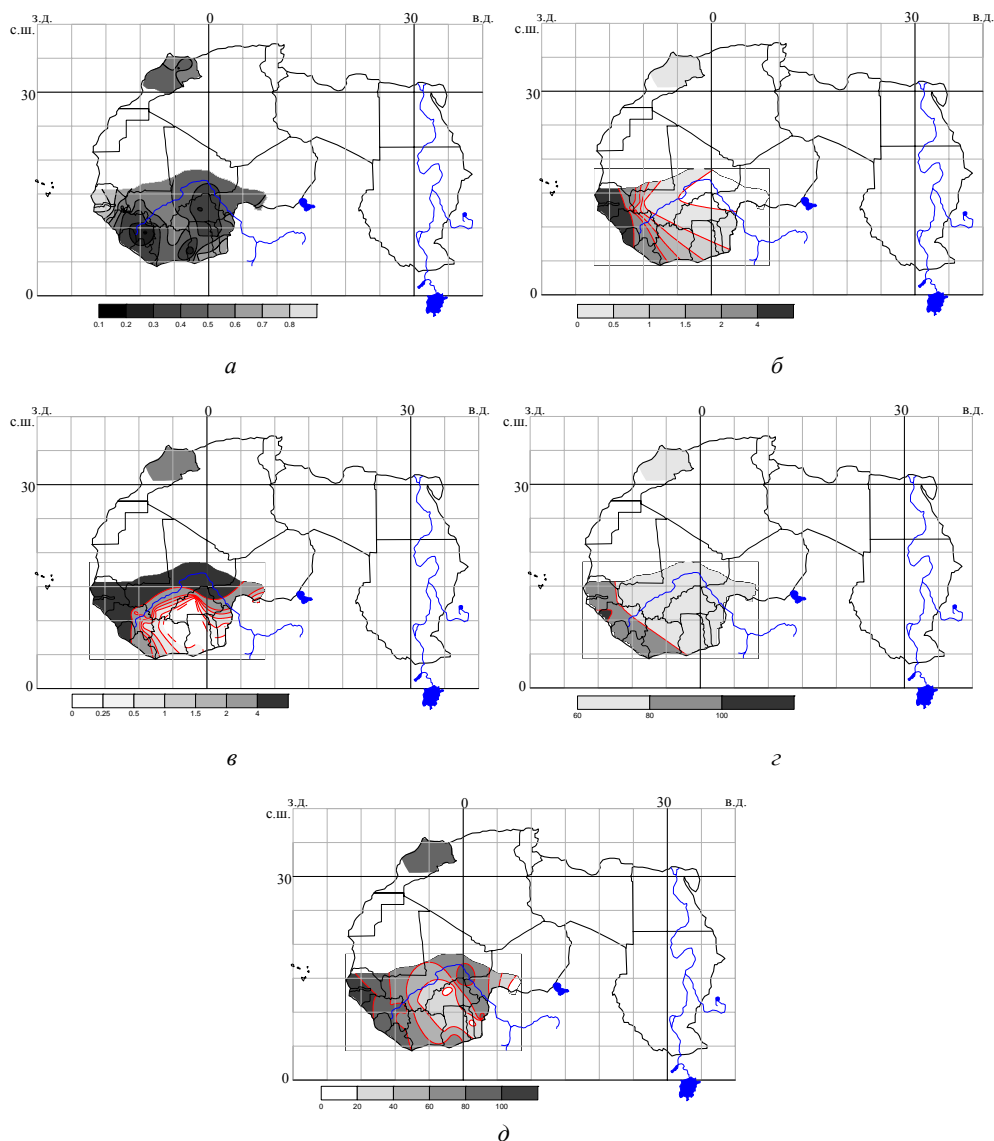


Рис. 1. Фактические (*a*) и прогнозные по первому (*б*) и второму (*в*) вариантам прогнозные карты коэффициентов вариации и их аномалии (*г* и *д* по первому и второму вариантам соответственно)

В первом варианте модели для обеспечения устойчивости необходимо усложнять модель, вводя дополнительные фазовые переменные, число которых определяется методами фрактальной диагностики [3, 4]. Расчеты показывают, что размерность пространства вложения для Северной Африки (Алжир, Марокко) не превосходит трех, а для Западной – два.

Выводы

1. Впервые для Северо-Западной Африки выполнены прогнозные оценки долгосрочных изменений расчетных гидрологических характеристик многолетнего годового стока по наиболее вероятному сценарию на 2040–2069 гг. Эти прогнозы указывают, что неблагоприятной с точки зрения ожидаемых значений C_v является вся рассматриваемая территория, где отклонения прогнозных значений от фактических достигает 130 %. Только среднее течение Нигера по этому параметру оказывается нечувствительным к изменениям климата.

2. Выполненные оценки по двум вариантам модели показали, что прогнозы оказываются более устойчивыми, если шумы, связанные с коэффициентом стока, вводить в уравнение совместно с внешними воздействиями за счет осадков аддитивно, т. е. использовать эффективные осадки (с учетом потерь на испарение). Однако этот вариант модели предполагает режим формирования стока равновесным (квазистационарным).

3. При неравновесном режиме формирования стока использование эффективных осадков нарушает причинно-следственные связи, так как реально испарение происходит после внешнего воздействия на водосборы и в общем случае должно рассматриваться как равноценная расходу фазовая переменная. В этом случае модель должна погружаться в более «широкое» фазовое пространство, размерность которого (пространства вложения) по данным фрактальной диагностики Северо-Западной Африки, как правило, не превосходит трех, а чаще всего – двух.

Литература

1. Громова М.Н. Методика долгосрочных оценок характеристик группировок минимального стока в современных условиях и при изменении климата: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук., 2009. – 155 с.
2. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов: Учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2006. – 559 с. (первое издание Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: РГГМУ, 1993. – 256 с.).
3. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куасси А.Г. Фрактальная диагностика речного стока для устойчивого описания многолетних колебаний гидрологических характеристик // Метеорология и гидрология, 2008, № 4, с. 73–80.
4. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куасси А.Б.Г. Прогнозирование изменений фрактальной размерности многолетнего речного стока // География и природные ресурсы, 2008, № 4, с. 136–143.
5. Коваленко В.В. Оценка гидрологической надежности гидротехнических сооружений при неустановившемся климате // Гидротехническое строительство, 2010, № 4, с. 41–45.
6. The IPCC Assessment Reports // [Электронный ресурс]: IPCC, 2009. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch>

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 2.1.1/3355, научный руководитель проф. В.В. Коваленко, РГГМУ).