

*В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова, В.А. Хаустов,
М.Н. Громова, В.С. Девятков, Е.В. Шевнина*

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА МНОГОЛЕТНИЙ
СЛОЙ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК
АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ**

*V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Victorova, V.A. Khaustov,
M.N. Gromova, V.S. Devyatov, E.V. Shevnina*

**INFLUENCE OF CHANGE OF A CLIMATE ON A LONG-TERM
LAYER OF A FLOW OF A SPRING HIGH WATER
OF THE RIVERS OF THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA**

Рассматривается методика долгосрочного прогноза (сценарной оценки) изменения вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья в арктической зоне РФ при возможном изменении климата. На примере репрезентативных водосборов рек арктической зоны России показано выявление статистически значимых изменений нормы и коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья.

Ключевые слова: сток весеннего половодья, долгосрочный прогноз, изменение климата.

The long-term forecasting method (scenarios assessment) of the flood probabilistic characteristics is considered for the Russian Arctic region. The zones of significant changes on spring flood multiyear average and variation are shown by the example of representative arctic watersheds.

Key words: flow of a spring high water, long-term forecast, change of a climate.

Введение

Рассматривается методика долгосрочного прогноза (сценарной оценки) изменения вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья в арктической зоне РФ при возможном изменении климата. Данные наблюдений за температурой воздуха показывают, что имеют место статистически значимые тренды, указывающие на потепление климата (споры ведутся, в основном, только о его причинах) [Solomon ..., 2007]. В работе рассматривается также вопрос о наличии трендов начальных моментов вероятностных распределений стока весеннего половодья на реках арктической зоны. Выявление трендов статистических моментов проводится на основе критериев Стьюдента, Фишера и Колмогорова–Смирнова. Долгосрочный прогноз изменения статистических характеристик стока весеннего половодья дается по одному из вероятных климатических сценариев на примере арктической зоны Северного края России.

Исходные данные и методика исследования

В целом подобная методика была разработана [Коваленко, 1993], в ее основе лежит линейный формирующий фильтр:

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (1)$$

где Q – расход воды (слой, модуль); $c = \bar{c} + \tilde{c} = 1/k\tau$; $N = \bar{N} + \tilde{N} = \dot{X}/\tau$ (здесь $c = 1/k\tau$; k – коэффициент стока; τ – время релаксации бассейна; $N = \dot{X}/\tau$, \dot{X} – интенсивность осадков); \bar{N} и \bar{c} – математические ожидания; \tilde{N} и \tilde{c} – случайные процессы типа белого шума с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$ и $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$; t – время.

Уравнение (1) статистически эквивалентно уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), которое описывает эволюцию распределений марковских случайных процессов (к ним относятся и процесс формирования слоя стока весеннего половодья):

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

где $p(Q)$ – плотность вероятности расхода воды; $A(Q, t)$, $B(Q, t)$ – коэффициенты сноса и диффузии, определяемые физико-статистическими характеристиками речных бассейнов и климатических воздействий на них.

В общем случае задание $p(Q)$ эквивалентно заданию бесконечного числа начальных моментов m_i ($i = 1, 2, \dots$), характеризующих распределение плотности вероятности. Так как на практике из-за коротких рядов наблюдений ограничиваются тремя моментами, то аппроксимируем уравнение (2) системой обыкновенных дифференциальных уравнений [Коваленко, 2007]:

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

Трех моментов достаточно, чтобы с помощью системы (3) моделировать или прогнозировать эволюцию трех расчетных характеристик [нормы стока m_1 , коэффициентов вариации $C_v(m_1, m_2)$ и асимметрии $C_s(m_1, m_2, m_3)$], используемых для изучения максимального стока весеннего половодья. Для параметризации модели используются карты приложения к СНиПу 2.01.14-83 [СНиП 2.01.14-82, 1985], на которых представлены значения расчетных гидрологических характеристик. Для выявления наличия трендов начальных моментов распределений использовалась методика скользящих 20-леток, описанная в [Пространственно временные колебания..., 1988]. Рассчитанные слои стока сравнивались с опубликованными в изданиях ГВК (основные гидрологические характеристики и многолетние данные о ресурсах поверхностных вод).

Параметризация проводится обратным пересчетом по системе (3) при $dm_i/dt = 0$, т. е. для условий квазистационарного статистического гидрологического режима для которого справедливы карты m_1 и C_v . За последнее десятилетие

тие были предложены различные варианты параметризации и усложнения системы (3) [Коваленко, 2009], однако, в данной работе применен один из наиболее практических методов, основанный на допущении, что время релаксации речных бассейнов равно одному году. Это подтверждается характером автокорреляционных функций для подавляющего числа бассейнов, площадь которых соответствует квазигоризонтальному участку редуцированных зависимостей и действует механизм зонального формирования стока. Асимметрию распределения (связанную с третьим моментом и взаимной интенсивностью шумов) можно «навязать», применив фиксированное соотношение C_s/C_v . Практически это означает, что при решении прямой задачи сначала из (3) находят m_1 и m_2 (при $G_{\bar{c}} \approx 0$, $G_{\bar{c}\bar{N}} = 0$), а затем, зная $C_v(m_1, m_2)$ и расчетное соотношение C_s/C_v определяют коэффициент асимметрии. С точки зрения параметризации эти функции позволяют легко вычислять $\bar{c} = 1/k$, $\bar{N} = \bar{X}$ (так как $\tau = 1$) и $G_{\bar{N}}$ из второго уравнения системы (3) при известных из карт значениях C_v и m_1 (следовательно, и m_2). (Корни подобного, заведомо упрощенного, подхода к параметризации находятся в боязни натолкнуться на неустойчивость решения системы (3): при $\bar{c} \approx G_{\bar{c}}$ спектр ее собственных значений может содержать положительные значения.)

После параметризации (она в нашем случае приведена на географической сетке Северного края с дискретностью 3° по долготе и 2° по широте), встает проблема выбора климатического сценария. Задавая в системе (3) прогнозную норму осадков $\bar{N}_{\text{пр}} (\equiv \dot{X}_{\text{пр}})$ и параметр $\bar{c}_{\text{пр}} = 1/k_{\text{пр}}$, коэффициент стока в первом приближении оставлен неизменным ($k_{\text{пр}} = k$), рассчитываем значения первых трех моментов распределений, соответствующих прогнозной климатической ситуации.

В нашем случае в качестве климатического сценария выбран COMMIT модель GFDL-CM 2,0 [Solomon..., 2007]. Сценарий носит равновесный характер, и прогностическая задача решается в предположении $dm_i/dt = 0$, т. е. делается алгебраическая оценка ожидаемых моментов m_1, m_2, m_3 . Хотя, и в этом случае надежнее C_s не вычислить на основе знания ненадежного момента m_3 , задавать исходя из выбранного соотношения C_s/C_v , предположив, что это соотношение не изменится в новых климатических условиях.

Результаты и их обсуждение

Выявление трендов основных статистических моментов проводилось по данным 18 гидрологических постов, расположенных в пределах водно-ресурсной границы Арктики [Никаноров..., 2007] на реках с площадями водосборов не превышающих 50 тыс. км², 6 из них расположены на территории Северного края. Расчет слоев стока весеннего половодья проводились по методике ГГИ

[Методические рекомендации..., 1962]. Оценка погрешностей расчетов удлиненных рядов стока проводилась как по отдельному посту, так и по всей совокупности данных. В целом, 75 % рассчитанных слоев стока не отличаются от опубликованных более чем на 10 % (такова точность опубликованных данных). Проверка обеих выборок (расчетной и удлиненной, всего 283 значения) на принадлежность к одной генеральной совокупности осуществлялась по критерию Колмогорова–Смирнова [Митропольский, 1961], значение которого не превышало 0,06. Это на 5 % уровне значимости означает, что рассчитанные данные статистически не различимы (рис. 1, а), коэффициент корреляции между рассчитанными и опубликованными данными составил 0,96 (рис. 1, б).

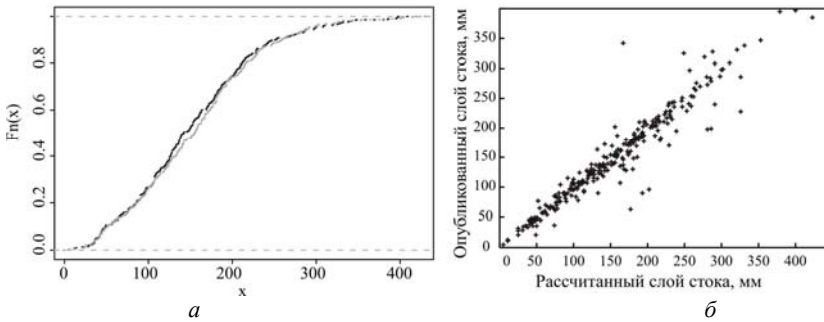


Рис. 1 Оценка погрешностей методики расчета слоев стока весеннего половодья: а – эмпирические кривые обеспеченности рассчитанных (серый) и опубликованных (черный) слоев стока; б – зависимость рассчитанных и опубликованных данных о слое стока

Статистический анализ однородности по m_1 (t-test), C_v (F-test), C_s (KS-test) удлиненных рядов слоя стока весеннего половодья показал наличие трендов на 50 % репрезентативных водосборов Северного края (табл., рис. 2).

Выявление нарушения стационарности рядов слоя стока весеннего половодья на территории Северного края в пределах водно-ресурсной границы Арктики

Код поста	Река – Пункт	Среднее / стандартное отклонение статистики			Однородность рядов*		
		t-test	F-test	KS-test	m_1	m_2	m_3
70238	Вымь – Весляна	1,32/0,98	1,19/0,78	0,23/0,06	+	+	+
70047	Солза – Сухие пороги	1,65/1,08	1,10/0,59	0,35/0,10	+	+	–
70309	Емца – Ж.Д. мост	0,87/1,13	1,32/0,82	0,26/0,09	+	+	+
70334	Пингеа – Кулогоры	0,37/0,55	1,94/0,9	0,26/0,06	+	+	+
70410	Печора – Якша	–0,4/1,17	1,19/0,07	0,28/0,05	+	+	+
70540	Сула – Коткина	1,43/0,78	1,19/0,56	0,38/0,09	+	+	–

Примечания: * «+» – гипотеза об однородности не отвергается; «–» – гипотеза об однородности отвергается.

Прогноз статистических характеристик слоя стока весеннего половодья на новую климатическую ситуацию, соответствующую сценарию COMMIT модель GFDL-CM 2,0, показал, что наблюдаются существенные (более 20 %) изменения коэффициента асимметрии (рис. 3, б) и нормы (рис. 3, а) стока к 2050 г.

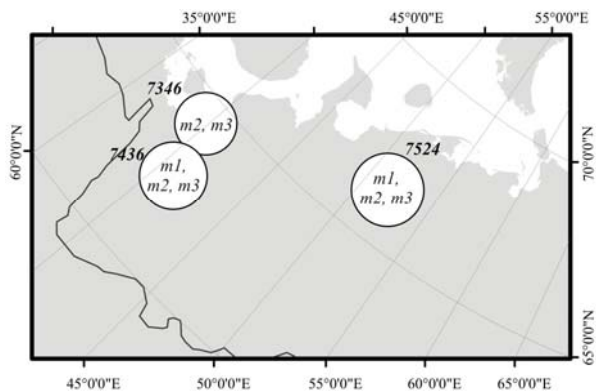


Рис. 2. Расположение водосборов Северного края, по которым наблюдались тренды первого (m_1), второго (m_2) и третьего (m_3) начальных моментов распределений слоя стока весеннего половодья

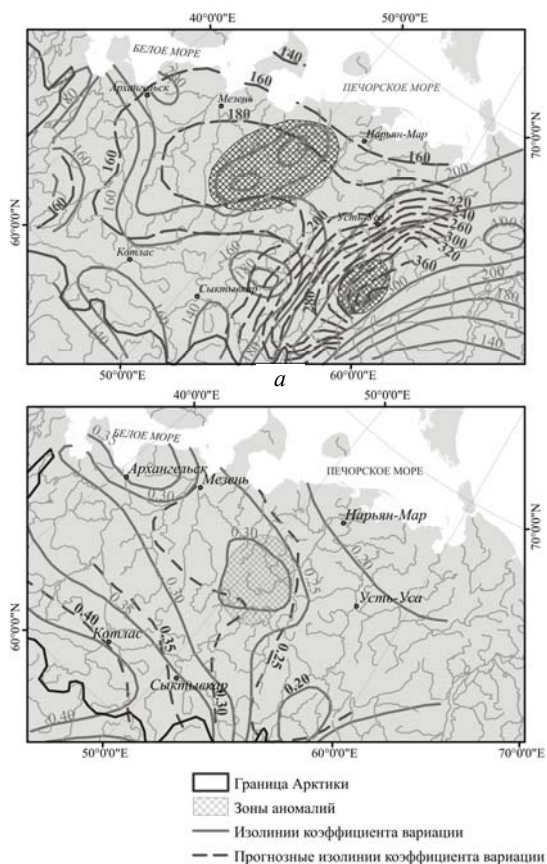


Рис. 3. Фактические (карты СНИП) и прогнозируемые к 2050 году нормы (a) и коэффициента вариации (b) слоя стока весеннего половодья и зоны их аномалий на территории Северного края

Выводы

Появление трендов начальных моментов вероятностных распределений на реках Северного края следует отнести к началу 1980-х. Нарушение стационарности может происходить за счет изменения факторов формирования стока, например, климата, оттаивания вечной мерзлоты, антропогенного воздействия на водосборы. В условиях нестационарности определение расчетных гидрологических характеристик для обоснования строительных проектов ненадежно [Коваленко, 2009].

До конца 1970-х на большинстве исследуемых водосборах не было выявлено трендов начальных моментов распределений, карты СНиП [СНиП 2.01.14-82, 1985] представляют статистические характеристики стационарного периода формирования стока весеннего половодья и использованы для параметризации стохастических моделей формирования стока.

На примере климатического сценария СОММТ к 2050 г. получены карты изменения нормы и коэффициента вариации стока весеннего половодья на территории Северного края. Выявлены зоны, где ожидается изменения статистических характеристик слоя стока более чем на 20 % (зоны аномалий), занимающие 30 % (для нормы) и 20 % (для коэффициента вариации) территории арктической зоны Северного края.

Исследования выполнялись в рамках поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № П740.

Литература

1. Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 256 с.
2. Коваленко В.В. Частично инфинитная гидрология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 230 с.
3. Коваленко В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 100 с.
4. Методические рекомендации по составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 7, ч. 1 Половодье. – Л.: ГГИ, 1962. – 107 с.
5. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: 1961. – 479 с.
6. Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. – Ростов-на-Дону, 2007. – 271 с.
7. Пространственно временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 375 с.
8. СНиП 2.01.14-82. Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
9. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. – 996 pp.