

*В.В. Коваленко*

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

*V.V. Kovalenko*

## TRANSIENTS IN ESTIMATING LONG-TERM HYDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATE CHANGE

*Исследуется характер переходных процессов при численной реализации модели линейного формирующего фильтра, используемой для оценки долгосрочных гидрологических последствий изменения климата с помощью вероятностных распределений из класса К. Пирсона. Они лежат в основе действующего нормативного документа СП 33-101-2003 по проведению инженерных гидрологических расчетов при обосновании надежности проектируемых и действующих гидротехнических сооружений.*

*Ключевые слова: годовой сток, модель линейного формирующего фильтра, изменение климата.*

*We investigate the nature of transients in the numerical implementation of the model of a linear shaping filter used to estimate the long-term hydrologic impacts of climate change using probability distributions of the class K. Pearson. They lie at the basis of the current regulatory document BR 33-101-2003 for the engineering hydrological computations in justifying reliability planned and existing waterworks.*

*Key words: annual flow, model of linear shaping filter, climate change.*

### ***Проблемная ситуация, мотивирующая статью***

В последние десятилетия обсуждаются возможные последствия изменения климата для экономики. Производственные функции водозависимых отраслей последней носят мультипликативный характер и, наряду с финансовыми и трудовыми ресурсами, включают в себя всевозможные природные ресурсы, прежде всего, воду. Но в таком виде это утверждение носит слишком общий и нечеткий характер. Практический смысл имеет не только сам факт наличия воды, но и расчетные гидрологические характеристики многолетнего речного стока (среднегодового, максимального и минимального). Такими характеристиками являются: норма, коэффициенты вариации ( $C_v$ ) и асимметрии ( $C_s$ ). Их, согласно действующему нормативному документу в области гидрорасчётов СП 33-101-2003 [8], достаточно для определения обеспеченных

значений расходов воды, лимитирующих устойчивость работы существующих или проектируемых гидротехнических сооружений (к нормативным характеристикам следовало бы добавить параметры выбросов случайного процесса многолетнего стока в виде их частоты и продолжительности его пребывания за лимитирующими пределами; это важно, например, для планирования бесперебойной работы ГЭС или выявления самоочищающей способности рек). Поэтому для оценки гидрологических последствий климатических изменений нужны методики получения расчетных характеристик (например, в виде прогнозных карт) при задаваемых (известных — для гидрологов) сценариях климата. Методы расчетов, используемые в инженерной практике, не могут обеспечить прогнозирование в принципе, так как они опираются на фактические ряды наблюдений. Последних для будущего, естественно, не существует. Отсюда и появляется мотивация решения задачи, направленной на разработку соответствующего метода.

### *Аналоги решения рассматриваемой задачи*

На сегодняшний день известны четыре возможных подхода к решению данной задачи.

*Первый* — применение статистических зависимостей между стоковыми и климатическими (нормой осадков и температурой воздуха) характеристиками. В работе [1], с ссылкой на П.Я. Гройсмана [3] и Н.А. Сперанскую, указывается, что получены оценки «линейной связи годового стока рек СССР с изменением средней годовой приземной температуры воздуха в неэкваториальной части северного полушария (17,5–87,5° с.ш.)». Подобные связи позволяют выявлять вероятностную тенденцию изменения стока (см. с. 193 [1]). Это тоже гидрологический сценарий, но не дающий информацию о значениях нормируемых стоковых характеристик, требуемых СП 33-101-2003.

*Второй* — применение балансового метода для оценки возможных норм многолетнего годового стока [9, 10]. Этим методом можно получить сценарные карты изменения среднего годового стока (см., например, рис. 3.1 [10, с. 140]). Однако одной нормы мало для того, чтобы оставаться в рамках требований нормативного документа СП 33-101-2003. Для получения обеспеченных значений расхода, являющегося природным ресурсом для производственных функций водозависимых отраслей экономики, нужны значения коэффициентов  $C_v$  и  $C_s$ .

*Третий* — динамико-стохастический метод [2]. В нём используются многопараметрические модели, связывающие метеорологическую информацию с суточными значениями стока, с введением в них статистической неопределённости. Это даёт возможность представлять стоковые характеристики в виде кривых вероятностных распределений (см. [2, с. 209, 210]). Сам по себе этот подход, способствующий пониманию тонкостей формирования талого стока, разрабатывался, по-видимому, для задач прогнозирования максимального стока весеннего половодья с использованием композиционного метода М.А. Великанова. В монографии [2] подробно излагается способ формирования многосуточного половодья (для определения слоя стока и максимального расхода). В нём требуется 19 ч машинного времени (см. [2, с. 209]) для расчета одних суток в конкретном бассейне. Можно представить, сколько времени

потребовалось бы для получения вероятностных распределений по всем постам России (их несколько тысяч), чтобы выполнить расчеты хотя бы по одной модели общей циркуляции атмосферы. Но и этого сделать нельзя — нет ни одного поверочного прогноза на ретроспективном материале (два периода с разной водностью), чтобы убедиться в возможности «замораживания» многочисленных параметров модели. Последнее неизбежно, когда параметризация модели выполняется по текущему климату, а прогноз (сценарная оценка) делается под другие климатические условия. Кроме этого, надо иметь в виду, что климатические сценарии носят политический характер, и сами авторы, предлагая их в открытом доступе, дают недвусмысленные рекомендации использовать отнюдь не суточные данные, а осредненные значения за многолетний период (обычно 20–30 лет). Но самое главное состоит в другом. На с. 243 в монографии [2] приводятся графики вероятностных распределений стока весеннего половодья, полученные динамико-стохастическим методом, которые практически идентичны кривой Пирсона III типа. Последняя хорошо аппроксимирует эмпирические точки, что служит критерием эффективности динамико-стохастического метода. Но тогда возникает вопрос: зачем использовать многопараметрическую модель, если то же самое дает модель линейного формирующего фильтра (а дает она семейство распределений К. Пирсона), в основе которого лежит обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, имеющее только два параметра речного бассейна (коэффициент стока и время релаксации)?

Это вовсе не критика в адрес динамико-стохастического моделирования (оно позволяет глубоко проникнуть в физику формирования талого стока, отслеживая посуточное его изменение, но СП 33-101-2003 оперирует погодичными слоями стока половодья, на основе которых и находятся максимальные расходы), а только разграничение предметных областей (фиксирование «экологических ниш») данного подхода и подхода, основанного на использовании аппарата марковских случайных процессов. Это и есть *четвертый метод*, который обсуждается в следующем разделе статьи. Он предложен 25 лет тому назад и входит в учебные программы подготовки гидрометеорологов в вузах (см. [8]). У него есть свои недостатки. В данной статье рассматривается один из них, связанный с тем, что применение метода не дает ответа на вопрос: как будут вести себя расчетные гидрологические характеристики, если климатические сценарии в очередном докладе межправительственной группы экспертов по изменению климата будут носить нестационарный (в статистическом смысле) характер? Могут ли в переходном режиме появляться их выбросы относительно равновесных (статистически стационарных) режимов?

### *Прототип, его недостаток и цель исследования*

В качестве модернизируемого в данной статье прототипа (остальные три метода являются отдалёнными аналогами) рассматривается метод, основанный на стохастической модели линейного формирующего фильтра («зашумленное» дифференциальное уравнение первого порядка):

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

где  $Q$  — расход воды (модуль, слой стока);  $c = \bar{c} + \tilde{c}$  и  $N = \bar{N} + \tilde{N}$  (здесь  $c = 1/k\tau$ ,  $N = \dot{X}/\tau$  — коэффициент стока;  $\tau$  — время релаксации речного бассейна;  $\dot{X}$  — интенсивность осадков;  $\bar{c}$ ,  $\bar{N}$  — математические ожидания;  $\tilde{c}$ ,  $\tilde{N}$  — белые гауссовские шумы с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}$  и  $G_{\tilde{N}}$ , коррелирующиеся между собой с взаимной интенсивностью  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ ).

Уравнение (1) статистически эквивалентно модели Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК), которая описывает марковскую эволюцию процесса формирования плотности вероятности многолетнего стока. Модель ФПК аппроксимируется системой из четырёх дифференциальных уравнений для начальных моментов  $m_n$  (см., например, [6]):

$$dm_n/dt = nM[AQ^{n-1}] + 0,5n(n-1)M[BQ^{n-2}], \quad n = 1, 2, 3, 4, \quad (2)$$

где  $A, B$  — коэффициенты сноса и диффузии (их вид см. [6]);  $M[...]$  — математическое ожидание;  $n$  — порядок момента.

Конкретизация системы (2) будет приведена ниже. Алгоритм ее применения для гидрологической сценарной оценки изменения климата сводится к двум этапам: 1) параметризация модели по имеющимся картам (приложение к СНиПу 2.01.14-83 [7]), относящимся к статистически стационарному периоду (до 80-х гг. XX в.) — обратная задача; 2) введение в параметризованную модель сценарных характеристик климата и оценка моментов  $m_n$ , необходимых для построения прогнозных (сценарных) гидрологических карт — прямая задача. С деталями подобной технологии, позволяющей учитывать не только климатические, но антропогенные факторы подстилающей поверхности водосборов, можно ознакомиться по источнику [6]. Эта технология является прототипом методики, излагаемой ниже. Ее недостаток заключается в следующем. Так как климатические сценарии представляют собой «эволюционно-стационарные ступеньки» равновесных климатических режимов в 20–30 лет (см. рис. 1а), то и гидрологические прогнозируемые режимы являются статистически стационарными (в уравнении (2)  $dm_n/dt \equiv 0$ ). В результате этого (неизбежного) допущения остается открытым вопрос о характере *переходного* режима от одной ступеньки к другой. Он может быть и аperiodическим, и периодическим (колебательным) с выбросами значений  $m_n$  за пределы равновесных состояний. Конечно, это не недостаток прототипа в прямом смысле этого слова, а просто не рассмотренная до настоящего времени ситуация, которая может привести к неверным гидрологическим сценариям, дающим более статичную картину изменения расчётных гидрологических характеристик, *чем она может быть на самом деле*.

Цель заключается в получении ответа на данный вопрос, а именно: оценить возможный характер переходных процессов.

### *Оценка характера переходных гидрологических режимов при изменении климата*

Конкретизация уравнения (2) имеет следующий вид:

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

Особенностью системы (3) является то, что младшие моменты не зависят от старших, а значит «отбрасывание» последних оставляет систему уравнений замкнутой. Это открывает возможности существенного упрощения рассматриваемой модели. Например, можно ограничиться первыми двумя уравнениями и пренебречь взаимной интенсивностью  $G_{\bar{c}\bar{N}}$ , отвечающей за асимметрию вероятностного распределения. (Это не означает, что при сценарных оценках в таком упрощенном варианте игнорируется коэффициент асимметрии. Последний можно связать с коэффициентом вариации, используя в прогнозном варианте соотношение  $C_s/C_v$ , соответствующее фактическому режиму речного стока.)

Так как статистически неустойчивых климатических сценариев в открытом доступе нет (а может быть их пока не существует вообще), то имеет смысл исследовать переходной гидрологический процесс при ступенчатом входном воздействии метеоусловий. Очевидно, что это предельная ситуация; реально, климатическая система обладает инерцией и так резко («ступенчато») меняться не может. Поэтому таким же предельным будет и гидрологический расчётный сценарий, т.е. если будут выявлены выбросы моментов (или расчетных характеристик  $m_1$ ,  $C_v$  и  $C_s$ ), то их численные значения могут рассматриваться как верхняя экстремальная граница реальных переходных процессов.

**Пример расчета переходных режимов изменения статистических характеристик среднегодовых расходов воды.** На рис. 1а представлены графики изменения среднегодовых осадков  $X$  и температуры приземного воздуха  $T$  °С, соответствующие периоду фактических наблюдений (1951–1992 гг., р. Свияга — с. Ивашевка) и сценарию СОММИТ на 2040–2069 гг. Если ограничиться двумя моментами  $m_1^\Phi$  и  $m_2^\Phi$  (рис. 1б), то параметризация системы (3) дает следующие значения параметров, характеризующие моделируемый бассейн с замыкающим створом с. Ивашевка:  $\bar{c} = 6,13$ ;  $G_{\bar{N}} = 8544$  (размерность величин меняется в зависимости от того, каким образом учитывается сток: расходами, слоями или модулями; данные значения соответствуют случаю, когда в расчетах используются слои в мм). Изменим (скачком) значение нормы фактических осадков  $X^\Phi$  с 490 мм до  $X^{np} = 546$  мм. Графики решения для моментов  $m_1^{np}$  и  $m_2^{np}$  представлены на рис. 1б; расчеты велись при постоянном коэффициенте стока. Из него видно, что имеет место аperiодический переходный процесс для обоих моментов. Его продолжительность определяется задаваемым временем релаксации  $\tau$  и составляет значение порядка года (иногда больше), см.  $m_1^{np}(t)$  на рис. 1б, где  $\tau_2 > \tau_1$ . В случае если  $\bar{c}$  и  $G_{\bar{c}}$  соизмеримы, то возникает неустойчивость переходного процесса (см.  $m_2^{np}(t)$  на рис. 1б; пунктирная линия соответствует случаю  $G_{\bar{c}} > \bar{c}$ ). На рис. 2 процесс развития неустойчивости показан более наглядно (входное воздействие  $X$  задано в виде низкочастотной периодической функции  $X = X_0 + a \cdot \sin(\omega t)$ , где  $a$  — коэффициент;  $\omega$  — частота). Разумеется, ни  $m_2$ , ни  $C_v$  бесконечными быть не могут. Поэтому представленные иллюстрации развития неустойчивости указывают только на сам факт неспособности системы (3) в ее нынешнем виде при  $G_{\bar{c}} > \bar{c}$  описывать

процесс формирования расчётных гидрологических характеристик (методы борьбы с неустойчивостью см. [4, 5]).

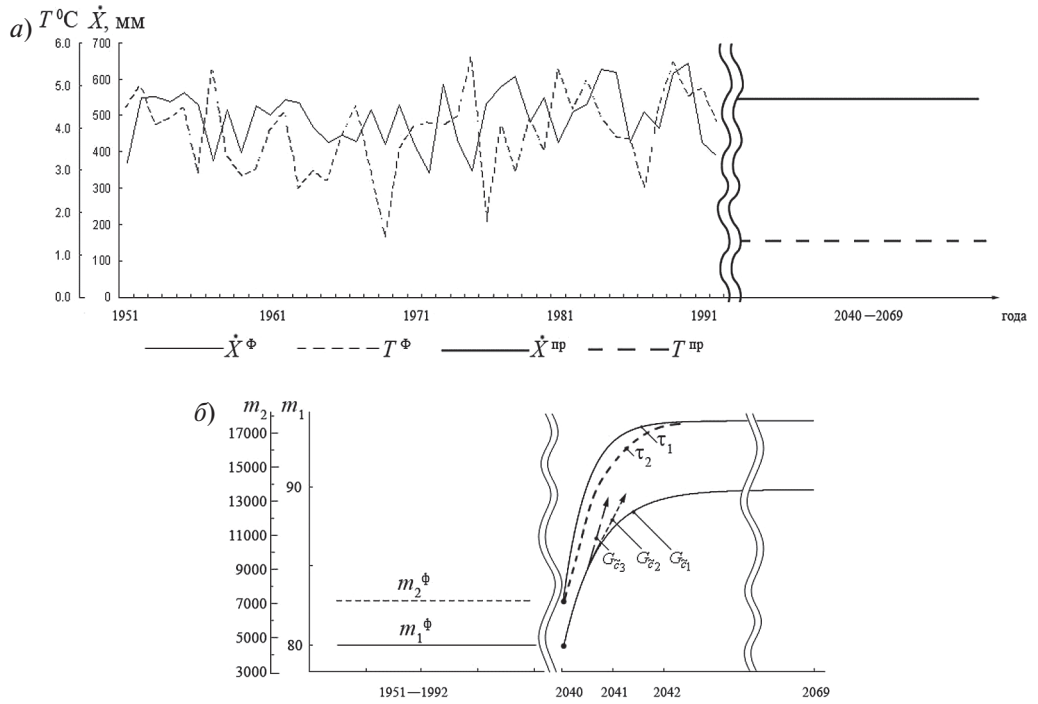


Рис. 1. Фактические и сценарный (сценарий СОММИТ 4-й доклад) ход метеозлементов (а) и переходные процессы изменения начальных моментов (б) при различных значениях параметров модели (3):  $G_{\bar{c}_1} = 0$ ;  $2\bar{c} > G_{\bar{c}_2} > 0$ ;  $G_{\bar{c}_3} > 2\bar{c}$ ;  $\tau_2 > \tau_1$

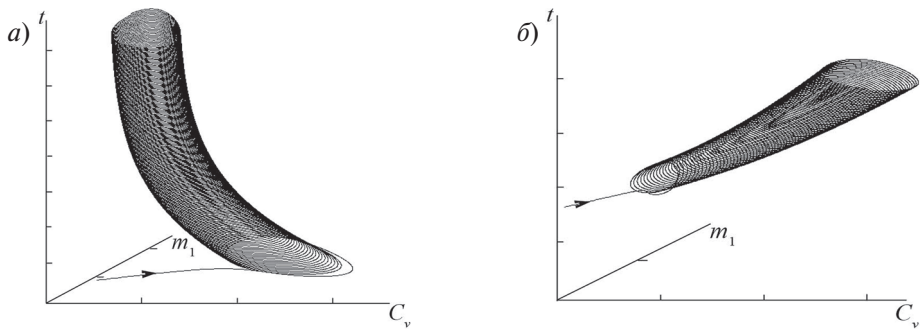


Рис. 2. Устойчивый (а) и неустойчивый (б) режимы изменения расчётных гидрологических характеристик ( $m_1$ ,  $C_v$ )

### **Выводы**

1. В рамках модели линейного формирующего фильтра, приводящего к классу вероятностных распределений К. Пирсона, переходные процессы носят апериодический характер, что исключает появление выбросов расчётных гидрологических характеристик за уровень, соответствующий равновесному климатическому сценарию.
2. Продолжительность адаптации многолетнего годового стока (его расчётных гидрологических характеристик: нормы стока и коэффициента вариации) к новым климатическим условиям зависит от времени релаксации речного бассейна. В течение одного года (иногда нескольких лет) происходит экспоненциальное нарастание (убывание) численных значений расчётных характеристик до их значений, соответствующих статистически установившемуся (равновесному) режиму.
3. При больших значениях интенсивности внутреннего шума речного бассейна (это происходит примерно на 30 % территории России) решения модели теряют устойчивость и требуется переход к более общим моделям, методы построения которых рассмотрены в работах [4, 5, 6].

Работа частично финансировалась грантом Министерства образования и науки РФ по теме «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ 1413, номер государственной регистрации 01 2014 58678).

### **Литература**

1. *Винников К.Я.* Чувствительность климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 224 с.
2. *Гельфан А.Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. — М.: Наука, 2007. — 279 с.
3. *Гройсман П.Я.* Эмпирические оценки связи процессов потепления и похолодания с режимом увлажнения территории СССР. // Изв. АН СССР, серия геогр., 1981, № 5, с. 86–95.
4. *Коваленко В.В.* Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. — СПб.: РГГМУ, 2011. — 107 с.
5. *Коваленко В.В.* Применение вероятностной модели для устойчивых долгосрочных оценок модальных значений характеристик многолетнего речного стока. // Метеорология и гидрология, 2014, № 1, с. 85–91.
6. *Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдужова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е исправ. и доп. — СПб.: РГГМУ, 2006. — 559 с.
7. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. // Госстрой СССР. — М.: Стройиздат, 1985. — 36 с.
8. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М.: ФГУП ЦПП Госстрой России, 2004. — 73 с.
9. *Шикломанов И.А.* Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 153 с.
10. *Шикломанов И.А.* Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 336 с.