

УДК 556.16:[001.891:378.4]

doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-255-268

## **Результаты исследований вероятностных гидрологических процессов в РГГМУ**

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

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
oderiut@mail.ru

Рассматривается методология устойчивого прогноза стока и диагностирования бифуркаций его формирования, разработанная в РГГМУ и позволяющая решать принципиально новые гидрологические задачи (в том числе задачи инженерной гидрологии), связанные с возможностью получения долгосрочных оценок вероятностных характеристик многолетнего речного стока в условиях эволюционного изменения стокоформирующих факторов (климата и антропогенной деятельности на водосборах). Полученные результаты принадлежат направлению исследований в гидрологии, связанному с возможностью фактического и прогностического диагностирования пространственно-временных (географическо-исторических) очагов качественных изменений (неустойчивостей и бифуркаций) в механизмах стокообразования.

*Ключевые слова:* многолетний речной сток, устойчивость, прогнозирование, математическая модель, аттрактор, частично инфинитная гидрология.

## **Results of probabilistic hydrological processes research at RSHU**

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

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Currently, long-term estimates can be obtained either under the assumption of statistical stationarity of hydrometeorological processes using actual series of observations for the previous decades, i.e., in fact, by extrapolating “frozen” current probabilistic estimates to the future, or by modeling (calculation) based on equilibrium climatic scenarios under the assumption of statistical sustainability of runoff series, according to which parameterization of forecast models of runoff formation is conducted.

The article considers the methodology of partially infinite hydrology, which includes sustainable forecasting of runoff and diagnostics of bifurcations of its formation, allows solving fundamentally new hydrological problems (including problems of engineering hydrology) related to the possibility of obtaining long-term estimates of probabilistic characteristics of long-term river runoff under the conditions of evolutionary changes in the runoff formation factors (climate and anthropogenic activity in catchment areas).

Using the methods and patterns of partially infinite hydrology and relying only on the available hydrometeorological information (obtained at the state network of standard observations), known climatic scenarios and plans for the socio-economic development of the territory, the following main results have been obtained: 1) river basins have been diagnosed (as well as time intervals in the future), the ones in which (and when) it is possible to change the additive mechanism of the smooth evolution of the flow formation

process to a bifurcation mechanism (the appearance of bifurcation foci) being identified, i.e. engineering hydrology documents can be questioned; 2) a methodology has been developed for sustainable forecasting of the probabilistic characteristics of long-term river runoff using various options for its formation models (unimodal, polymodal, one-dimensional, multidimensional, etc.).

*Keywords:* long-term river flow, sustainability, forecasting, mathematical model, attractor, partially infinite hydrology.

---

**For citation:** *V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Victorova, V.A. Khaustov, V.S. Devyatov.* Results of probabilistic hydrological processes research at RSHU. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 60: 255—268. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-255-268

---

## Введение

В статье рассматриваются результаты исследований вероятностных гидрологических процессов, полученные научной школой под руководством профессора В.В. Коваленко за последнее десятилетие. Научная школа официально зарегистрирована в реестре Санкт-Петербурга [1] и включает в себя более двух десятков человек. Ими опубликовано 13 монографий, девять учебных изданий и более 80 статей, посвященных в основном общим и частным вопросам частично инфинитной гидрологии.

## Формулировка решаемой проблемы

Действующий в инженерной гидрологии нормативный документ СП-33-101-2003 основан на статистической обработке фактических рядов наблюдений за многолетним речным стоком (годовым, минимальным, максимальным). Этот свод правил (СП) является итогом длительной, начиная с работ Д.И. Кочерина в 20-х годах XX века, эволюции нормативной документации в области гидрологического обеспечения надежности водохозяйственных проектов и в целом до настоящего времени отвечал практическим потребностям. Однако заложенная в нем идея самодостаточности фактических рядов только расходов воды (в предположении их статистической стационарности) давно вызывала опасения. Например, еще на II Всесоюзном гидрологическом съезде (1928 г.) гидролог Е.В. Опоков указал, что «сводная работа Д.И. Кочерина по изучению стока для целей гидросиловых установок носит статистический характер без связи с атмосферными осадками и другими факторами стока».

В настоящее время эти опасения подтверждаются следующим обстоятельством. В связи с изменением климата, подстилающей поверхности водосборов (вырубка лесов, распашка и др.), т. е. изменением факторов формирования стока, экстраполяция статистически обеспеченных (предшествующими наблюдениями) расходов воды на период эксплуатации проектируемых сооружений (десятки и сотни лет) становится неправомерной. Нужны не только фактические ряды стока, по которым строятся эмпирические кривые обеспеченности и аппроксимирующие их аналитические распределения, но и математические (генетические) модели формирования статистического режима многолетнего речного стока, в которые

можно было бы вводить сценарные значения климатических характеристик и изменяющиеся числовые характеристики подстилающей поверхности водосборов.

Подобная модель была предложена коллективом научной школы Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) [2]. Модель базируется на линейном формирующем фильтре

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

статистически эквивалентном уравнению Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК):

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

которое является основной моделью марковских случайных процессов.

Выбор именно этой модели обоснован тем обстоятельством, что она имеет устойчивый класс решений в виде распределений семейства кривых К. Пирсона, которые лежат в основе СП. Этот класс распределений математически описывается решениями уравнения Пирсона

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p,$$

коэффициенты которого (их численные значения определяются начальными моментами) изначально не имели какого-либо физического, в том числе и гидрологического, смысла и носили «подгоночный» характер (варьируя этими коэффициентами, аналитические распределения «подгоняли» под эмпирические). Вывод уравнения Пирсона как частного случая уравнения ФПК, приводящего к устойчивому классу решений для моментов, позволил придать этим коэффициентам гидрометеорологический смысл. Они связываются с внешними климатическими воздействиями на водосборы и свойствами их подстилающей поверхности:

$$a = (G_{\tilde{c}\bar{N}} + 2\bar{N}) / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}), \quad b_0 = -G_{\bar{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}), \\ b_1 = G_{\tilde{c}\bar{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}), \quad b_2 = -G_{\tilde{c}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}).$$

Вследствие придания смысла коэффициентам оказалось возможным моделировать, а значит, и прогнозировать, формирование статистического режима многолетних видов речного стока, опираясь на характеристики климатических сценариев и различные варианты антропогенной деятельности на речных бассейнах. Освоение подобных (генетических) моделей открыло перед стохастической гидрологией возможность решать не только описательные задачи (констатировать по фактическим рядам наблюдений те или иные виды вероятностных распределений), но и задачи прогностические: какие распределения следует ожидать при возможных сценариях изменения климата и интенсивности хозяйственной деятельности.

Освоение новых возможностей породило и новые проблемы. Наличие эволюционных моделей формирования статистического режима многолетнего стока,

например, в виде системы дифференциальных уравнений для моментов, аппроксимирующих распределение плотности вероятности расходов воды:

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

позволяет исследовать устойчивость распределений для различных географических зон как при существующем климате, так и в перспективе его возможных изменений. Выяснилось, что почти на половине речных бассейнов, как в России (особенно в южных регионах в зоне недостаточного увлажнения), так и за рубежом, сток описывается неустойчиво — в рамках семейства кривых Пирсона — по третьему, а часто и по второму начальным моментам [3]. Визуально это проявляется в наличии либо «толстых хвостов» у распределений, либо полимодальности.

Проблемная ситуация, сложившаяся в гидрологии, заключается в противоречии между онтологическим базисом инженерной гидрологии, основанном на асимметричных одномодальных распределениях (получающихся при аппроксимации эмпирических распределений и при решении эволюционной генетической модели, базирующейся на линейном формирующемся фильтре), и реальными «толстохвостовыми» и полимодальными распределениями, имеющими место либо в регионах неустойчивости решений подобной модели, либо — при некоторых климатических сценариях — в любых регионах.

В практическом смысле данная проблемная ситуация заключается в противоречии между действующими нормативными документами, «смотрящими» на гидрологический мир как статистически застывший (с вытекающими отсюда рисками при принятии управленческих водохозяйственных решений), и реалиями окружающей нас (речные бассейны) климатической и антропогенной действительности (меняющейся и развивающейся).

### Цели научных исследований последнего десятилетия

Обозначенная проблемная ситуация включает два аспекта противоречий между нормативной гидрологией и реальным положением дел в гидрометеорологии.

1. Отсутствие в нормативных документах положений о том, что статистический режим рек может эволюционировать. Поэтому в основе свода правил СП-33-101-2003 основной упор делается на фактические ряды наблюдений. Тем самым ситуация, характеризующая многолетний режим стока (а именно, вычисленные по этим рядам обеспеченные значения проектных расходов), передается в будущее без учета возможности изменения за этот период факторов формирования стока.

2. Отсутствие понятия «статистическая» устойчивость процесса формирования стока [4]. Если и встречаются слова «неустойчивость моментов», то имеется в виду неустойчивость статистических оценок эмпирических моментов из-за коротких рядов наблюдений.

Научные исследования в РГГМУ за последнее десятилетие были преимущественно направлены на решение второго аспекта противоречий.

Первое же противоречие давно устранено, так как была разработана соответствующая методология, позволяющая получать прогнозные кривые вероятностных распределений под любой из предлагаемых сценариев изменения климата и подстилающей поверхности водосборов. Эта методология уже давно получила одобрение отделения наук о Земле АН СССР, вошла в учебные программы для вузов, освещена в двух изданиях учебника (1993 и 2006 г.) по «Моделированию гидрологических процессов» [5], а также в многочисленных монографиях. За рубежом подобной методологией владеют члены научной школы РГГМУ из Колумбии, Боливии, Камеруна, Кот-д'Ивуара, Мали (см., например, [6—9]).

Что же касается второго аспекта проблемной ситуации, связанной с диагностированием неустойчивостей и обеспечением условий, при которых прогнозные распределения (как, впрочем, и фактические) моделируются устойчиво, то в отношении многолетнего стока этим занимаются только члены коллектива научной школы РГГМУ. Это не означает, что похожими моделями больше никто не занимается. Уравнение ФПК, появившееся впервые за рубежом, носило эвристический характер и называлось изначально уравнением Фоккера — Планка (дополнение «Колмогоров» появилось только после того, как он вывел это уравнение строго математически в 1938 г.). Оно использовалось сотрудниками ИВП РАН для моделирования уровня озера (С.В. Музылев, В.Е. Привальский, Д.А. Раткевич, В.Н. Найденев и др.). Однако для прогноза долгосрочных изменений характеристик многолетнего стока с использованием климатических сценариев и гидрологических карт для параметризации системы уравнений для моментов, аппроксимирующей уравнение ФПК, оно впервые стало применяться именно в РГГМУ. Там же впервые был поставлен вопрос об устойчивости моментов, о бифуркационных диаграммах, диагностирующих условия появления полимодальных распределений с помощью логистических отображений, и, главное, была разработана методология частично инфинитного моделирования для борьбы с неустойчивостью начальных моментов вероятностных распределений путем увеличения размерности фазовых пространств, в которые «погружается неустойчивая по своим решениям модель». Решения новой модели с расширенной размерностью будут более устойчивыми.

Цели научных исследований последнего десятилетия заключаются в создании относительно целостной методологии, позволяющей, с одной стороны, диагностировать неустойчивости формирования вероятностных распределений и бифуркации (появление многомодальности), а с другой стороны, переходить к более сложным моделям в виде уравнений для многомерных распределений плотности вероятности или двумерных нелинейных отображений, полностью ликвидирующих неустойчивость или сужающих области бифуркационных очагов.

### **Методы исследования**

В основе достижения целей и получения результатов рассматриваемых научных исследований лежит методология частично инфинитной гидрологии и соответствующие ей методы и методики [10—13]. В частично инфинитной гидрологии

развитие интерпретируется как увеличение размерности фазового пространства системы, в котором изучаемая предметная область представлена моделью с фиксированным набором компонентов вектора состояния. Появление у последнего новых компонентов (расширение фазового пространства) может произойти только через неустойчивость (атрибут развития) решения, т. е. прекращение действия условий, обеспечивающих его корректность. Любая же модель связывает вектор состояния с вектором известных внешних воздействий и вектором задаваемых параметров (коэффициентов модели). Вектор коэффициентов модели обеспечивает интерфейс системы с окружением, и именно «оживление» его составляющих (превращение задаваемых коэффициентов модели в искомые фазовые переменные, «живущие» в одном темпомире с уже существующими фазовыми переменными) является задачей моделирования в частично инфинитной гидрологии. Ее основные элементы заключаются в следующем:

1) выявление условий, при которых происходит потеря устойчивости решения модели, описывающей рассматриваемую развивающуюся гидрологическую систему;

2) определение необходимого числа фазовых переменных для устойчивого моделирования развивающейся (теряющей устойчивость) системы (осуществляется методами фрактальной диагностики, которая позволяет, анализируя только одну, доступную непосредственным измерениям фазовую переменную — в нашем случае расход воды, определить число других участвующих в процессе формирования стока «скрытых» фазовых переменных) [13];

3) определение качества этих переменных (что это за переменные) — это наиболее творческий этап во всем процессе частично инфинитного моделирования, так как не поддается полной формализации (отсюда и название «частично инфинитное», т. е. частично неопределенное);

4) «обычное» моделирование (и прогнозирование) устойчивого функционирования расширенной (за счет новой фазовой переменной) системы;

5) выявление условий потери устойчивости уже расширенной системы и т. д. («по кругу»).

### Результаты научных исследований

Начиная с 80-х годов прошлого века стохастические модели широко применяются в РГГМУ в задачах гидрометрии, моделирования руслового стока, а главное — для долгосрочных оценок вероятностных характеристик многолетнего речного стока при изменении климата. Большой опыт их использования обозначил пределы их применимости, условий, при которых теряется устойчивость, и привел к пониманию того факта, что неустойчивость решений — это индикатор эволюционного развития гидрологического объекта (его качественного изменения). Адаптационный механизм развития (при котором вариации численных значений статистических моментов не меняют класс распределений плотности вероятности) может смениться бифуркационным механизмом (выход распределений за пределы своего класса, появление второй моды и т. п.). Подобные статистически

неустойчивые процессы возможно моделировать и прогнозировать, но «частично инфинитно» (основные этапы этой методологии приведены выше).

На основе методов и закономерностей частично инфинитной гидрологии и опираясь только на доступную гидрометеорологическую информацию (получаемую на государственной сети стандартных наблюдений), известные климатические сценарии и планы социально-экономического развития территории, за последнее десятилетие были получены следующие основные результаты.

1. Продиагностированы бассейны рек (и временные интервалы в будущем) и выявлены те, в которых (и когда) возможна смена аддитивного механизма плавной эволюции процесса формирования стока на бифуркационный механизм (появление бифуркационных очагов), т. е. возникновение ситуаций, когда применимость нормативных документов в области инженерной гидрологии можно поставить под сомнение (рис. 1) [14—16].

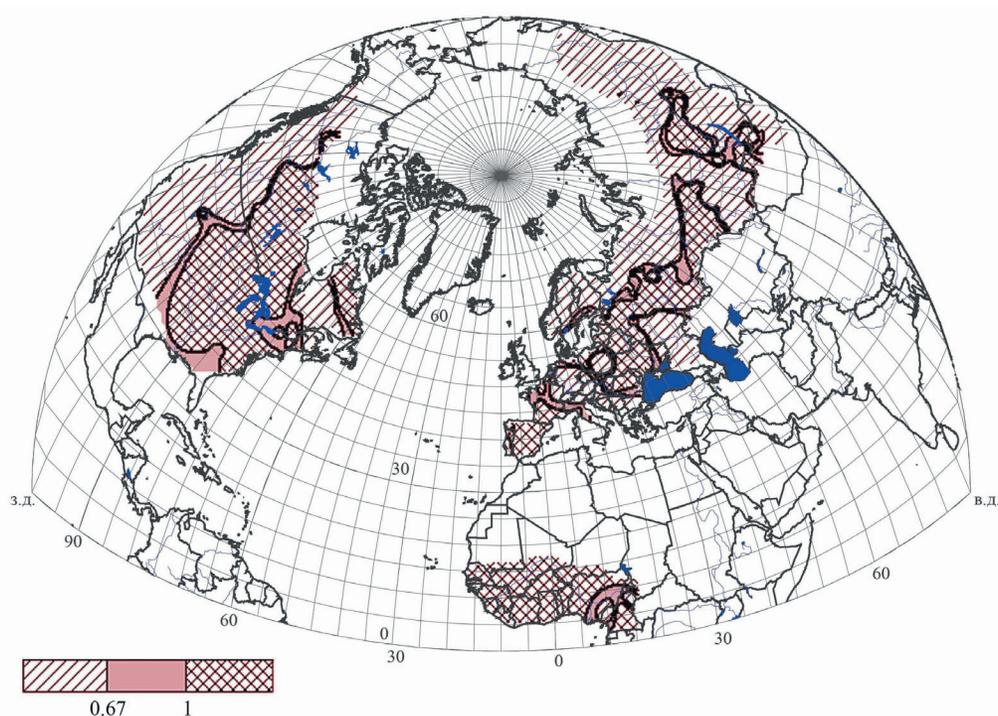


Рис. 1. Распределение зон неустойчивости начальных моментов многолетнего годового стока для Северного полушария ( $\beta = G_e/\bar{c} > 0,67$  — неустойчивость по третьему начальному моменту,  $\beta > 1$  — неустойчивость по второму начальному моменту).

Fig. 1. Distribution of unsustainability zones of the initial moments of long-term annual runoff for the Northern Hemisphere ( $\beta = G_e/\bar{c} > 0,67$  — unsustainability with regard to the third initial moment,  $\beta > 1$  — unsustainability with regard to the second initial moment).

Полученные результаты входят в направление исследований в гидрологии, связанное с возможностью фактического и прогностического диагностирования пространственно-временных географическо-исторических очагов качественных изменений (неустойчивостей и бифуркаций) в механизмах стокообразования.

2. Разработана методология устойчивого прогнозирования вероятностных характеристик многолетнего речного стока с использованием различных вариантов моделей (одномодальные, полимодальные, одномерные, многомерные и т. п.) [4, 11, 12, 17—19].

Первое препятствие на пути устойчивого прогнозирования заключается в наличии существенных мультипликативных шумов в стохастической модели формирования стока (3). Его можно сравнительно легко устранить, разгрузив модель от параметрических шумов и переведя их в аддитивные внешние воздействия (рис. 2):

— модель с мультипликативными шумами

$$(1 - 0,5\beta)m_1 = -0,5G_{\bar{e}\bar{N}} + \bar{X};$$

$$2(1 - \beta)m_2 = 2\bar{X}m_1 - 3G_{\bar{e}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}};$$

— модель с аддитивными шумами

$$(1 - 0,5\beta)m_1 = -0,5G_{\bar{e}\bar{N}} + k\bar{X};$$

$$2(1 - \beta)m_2 = 2k\bar{X}m_1 - 3G_{\bar{e}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}.$$

Второе препятствие на пути устойчивого моделирования и прогнозирования заключается в том, что основная фазовая переменная (расход воды), необходимая проектировщикам при гидрологическом обеспечении надежности сооружений, может взаимодействовать с другими фазовыми гидрометеорологическими переменными (например, с испарением или изменением влагозапасов в почвогрунтах).

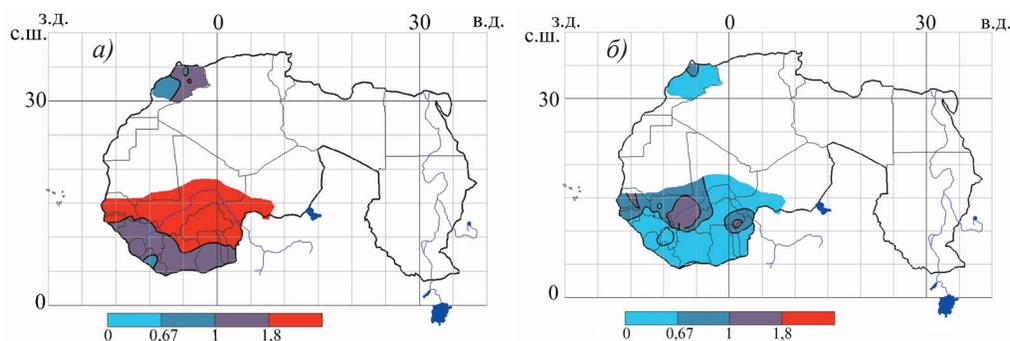


Рис. 2. Пример распределения критерия устойчивости  $\beta$  для мультипликативной (а) и аддитивной (б) моделей для Западной и Северной Африки.

Fig. 2. An example of the distribution of the stability criterion  $\beta$  for the multiplicative (a) and additive (b) models for West and North Africa.

Игнорирование потенциальных фазовых переменных при сценарной оценке обеспеченных значений расходов воды делает эти оценки неустойчивыми.

Следует переходить от использования безусловных распределений к условным [20], т. е. фиксированию одной из фазовых переменных модели либо с использованием существующих гидрологических карт ее статистических норм (например, многолетней нормы испарения), либо путем построения двумерных теоретических распределений (рис. 3).

Методология устойчивого прогноза стока и диагностирования бифуркаций его формирования позволяет решать принципиально новые гидрологические задачи (в том числе задачи инженерной гидрологии), связанные с возможностью получения долгосрочных оценок вероятностных характеристик многолетнего речного стока в условиях эволюционного изменения стокоформирующих факторов — климата и антропогенной деятельности на водосборах (см., например, рис. 4 и работы [21—23]).

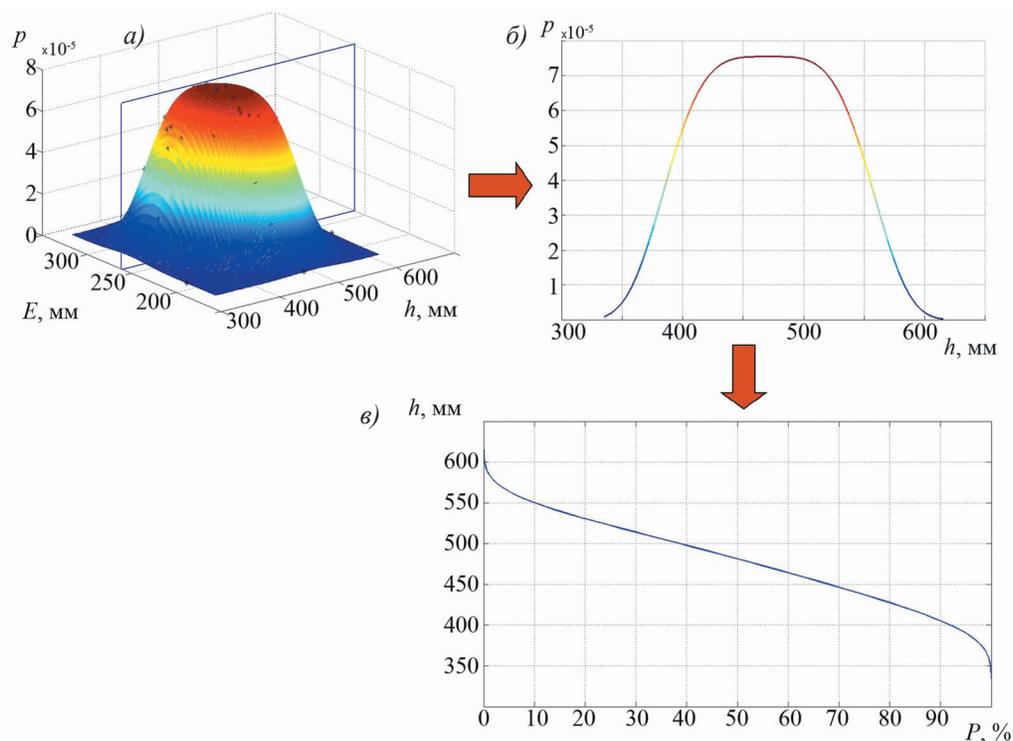


Рис. 3. Алгоритм получения условных кривых обеспеченности из двумерной поверхности плотности вероятности.

$a$  — теоретическая плотность вероятности,  $\bar{b}$  — условная плотность вероятности,  $\bar{c}$  — условная кривая обеспеченности.

Fig. 3. An algorithm for obtaining conditional security curves from a two-dimensional surface of probability density.

$a$  — theoretical probability density,  $\bar{b}$  — conditional probability density,  $\bar{c}$  — conditional security curve.

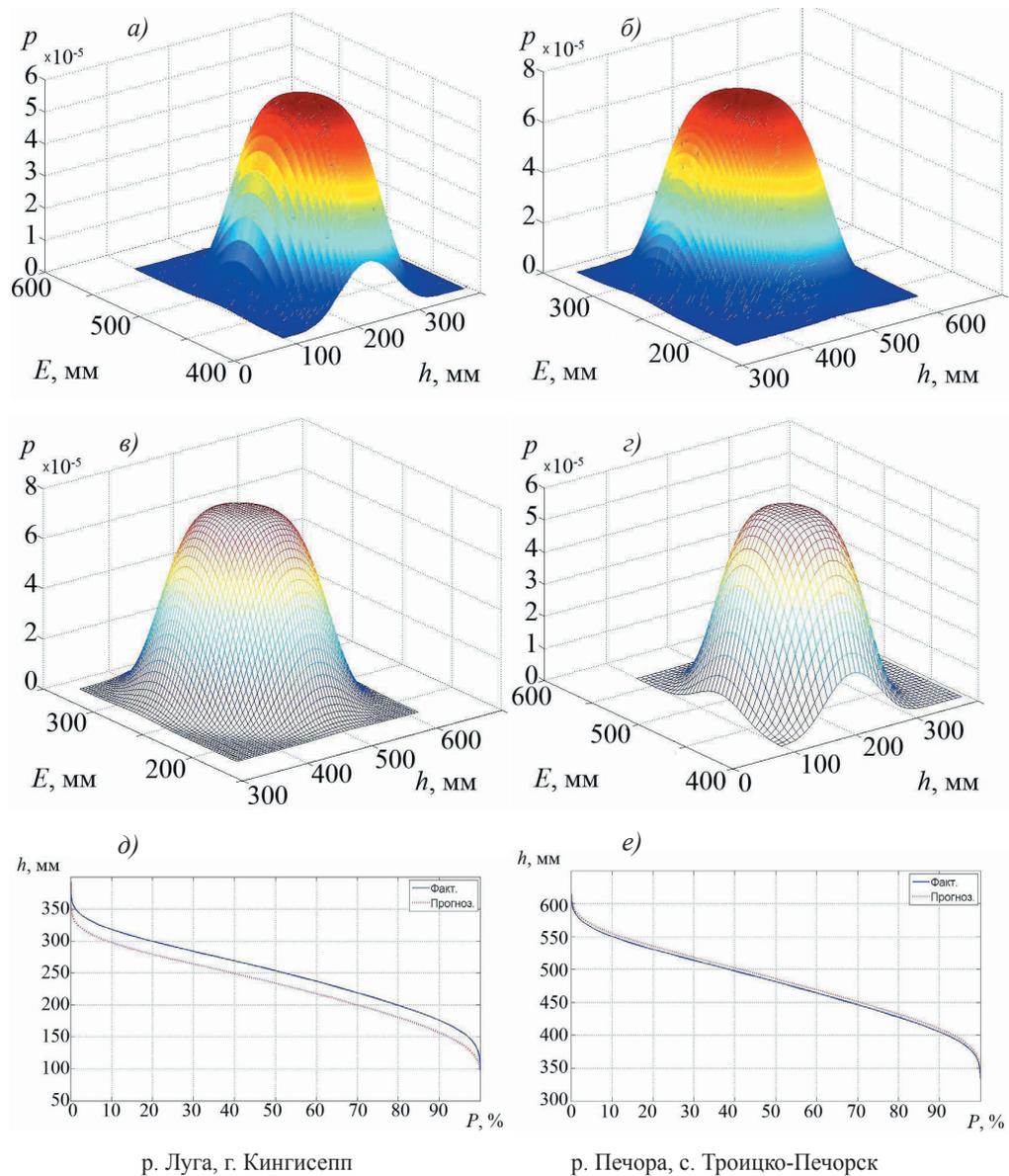


Рис. 4. Фактические (а, б) и сценарные (в, з) теоретические поверхности плотности вероятности, а также условные кривые обеспеченности (д, е).

Fig. 4. Actual (a, б) and scenario (в, з) theoretical probability density surfaces and conditional security curves (д, е).

## Заключение

Представленное исследование направлено на увеличение аттрактивных свойств решений прогностических моделей. Однако в условиях развивающегося гидрометеорологического процесса любые аттракторы (точечные для начальных моментов статистических распределений, периодические и «странные» для отображений) будут сами эволюционировать. Поэтому необходимо найти пути учета этих эволюционных изменений (степени нелинейности и размерности моделей), гарантирующие обеспечение устойчивости долгосрочных прогнозов [17].

В каком бы из вариантов (одномерном, многомерном или с помощью отображений) мы не пытались получить, спрогнозировать устойчивые вероятностные распределения, аттрактивность решений зависит от свойств окружающей среды. Эти свойства в моделях представлены задаваемыми параметрами, обеспечивающими интерфейс между зафиксированной моделью предметной областью (речным бассейном) и внешним воздействием окружающей среды (климатической системы). Окружающая среда (инфинитная реальность) вызывает «мутации» в механизме формирования стока. Если в модели это обстоятельство не учитывается, то ее решения перестают быть корректными — например, теряется устойчивость (аттрактивные свойства решений). Модель обладает эволюционными возможностями (возможностями в качестве решений давать устойчивые распределения) только в случае, если в ней самой заложена способность к преобразованию в сторону адекватного отображения изменившегося механизма формирования стока. А это возможно, если аттракторы частично инфинитны, т. е. порождающие их модели обладают интерфейсными возможностями для своего изменения.

## Благодарности

*Часть результатов исследований была получена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (Министерства образования и науки) РФ: П2588, П740, 01 2012 51675, 01 2012 80083, 01 2014 58678, ААА-А17-11703201019-5, FSZU-2020-0009.*

## Acknowledgments

*Part of the research results were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education (Ministry of Education and Science) of the Russian Federation: П2588, П740, 01 2012 51675, 01 2012 80083, 01 2014 58678, АААА-А17-11703201019-5, FSZU-2020-0009.*

## Список литературы

1. Список научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга, включенных в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга. СПб: изд. Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, 2013. <http://knvsh.gov.spb.ru/closedcontests/view/85/> Дата обращения 26.05.2020.
2. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В., Громова М.Н., Хаустов В.А., Шевнина Е.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических

- сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. СПб: изд-во РГГМУ, 2010. 50 с.
3. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Чистяков Д.В., Хамлили А. Прогностические модели развития процессов катастрофического формирования многолетнего годового речного стока // Метеорология и гидрология. № 10. 2010. С. 64—69.
  4. Коваленко В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. СПб: изд-во РГГМУ, 2011. 107 с.
  5. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. СПб: изд-во РГГМУ, 2006. 559 с.
  6. Dominguez E.A. et. al. A Fokker — Planck — Kolmogorov equation-based inverse modelling approach for hydrological systems applied to extreme value analysis // J. Hydroinformatics. IWA Publishing. 2017. DOI: 10.2166/hydro.2017.079.
  7. Pungo K.T., Rivera H.G., Bacca J.B.F., Álvarez M.A.L., Rivera M. Identification of uncertainty in the stochastic process in mean flows in the river Fonce — (San Gil — Santander) // Investigación en Ingeniería. 2016. V. 12 No. 1. <https://www.virtualpro.co/revista/avances-vol-12-num1/4>.
  8. Diawara H. Evaluation des zones a risque d'inondation sur les berges du fleuve Niger dans le district de Bamako // Sciences De L'Environnement, Lome (Togo). 2019. No. 16, V. 1. [https://www.researchgate.net/publication/337465417\\_EVALUATION\\_DES\\_ZONES\\_A\\_RISQUE\\_D'INONDATION\\_SUR\\_LES\\_BERGES\\_DU\\_FLEUVE\\_NIGER\\_DANS\\_LE\\_DISTRICT\\_DE\\_BAMAKO](https://www.researchgate.net/publication/337465417_EVALUATION_DES_ZONES_A_RISQUE_D'INONDATION_SUR_LES_BERGES_DU_FLEUVE_NIGER_DANS_LE_DISTRICT_DE_BAMAKO)
  9. Shevnina E., Silaev A. The probabilistic hydrological MARCSHYDRO (the Markov Chain System) model: its structure and core version 0.2. // Geoscientific Model Development. 2019. 12. P. 2767—2780. DOI: 10.5194/gmd-12-2767-2019.
  10. Коваленко В.В. Частично инфинитная гидрология. СПб: изд. РГГМУ, 2007. 230 с.
  11. Коваленко В.В. Метод характеристик в частично инфинитной гидрологии. СПб: изд. РГГМУ, 2012. 136 с.
  12. Коваленко В.В. Метаморфоз понятий частично инфинитной гидрологии в контексте деструкции онтологии М. Хайдеггером. СПб: изд-во РГГМУ, 2015. 132 с.
  13. Гайдукова Е.В. Фрактальная диагностика в моделировании гидрологических процессов. СПб: Астерион, 2017. 98 с.
  14. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л., Голованова Е.Ю. Обеспечение гидрологической надежности гидротехнических сооружений в регионах неустойчивого формирования многолетнего речного стока // Гидротехническое строительство. 2013. № 2. С. 38—43.
  15. Коваленко В.В. Модальная неустойчивость при формировании речного стока. СПб: изд-во РГГМУ, 2014. 190 с.
  16. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куасси М.К. Устойчивость формирования вероятностного режима многолетнего речного стока в Арктическом регионе России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 7—11.
  17. Коваленко В.В. Гидрометеорология: эволюция в пространстве понятий. СПб: изд-во РГГМУ, 2016. 239 с.
  18. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л., Бонгу С.Э., Джалалванд А. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 45—53.
  19. Гайдукова Е.В., Голованова Е.Ю., Коваленко В.В. Явление ненулевой нормы многолетних изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов. СПб: Астерион, 2019. 104 с.
  20. Гайдукова Е.В., Шаночкин С.В., Москалюк М.А. Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 52. С. 79—87.
  21. Гайдукова Е.В., Бонгу С.Э., Джалалванд А., Диавара Х. Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений // Евразийское научное объединение. 2018. № 7—2 (41). С. 139—142.
  22. Гайдукова Е.В., Баймаганбетов А., Синкпеун Л., Бонгу Э.С. Сценарная оценка нормы изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 113—122.
  23. Джалалванд А., Гайдукова Е.В. Выявление аномальных зон формирования речного стока для водозависимых отраслей экономики Ирана при изменении климата // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 2 (34). С. 71—74.

## References

1. *Spisok nauchnykh i nauchno-pedagogicheskikh shkol Sankt-Peterburga, vklyuchennykh v reyestr vedushchikh nauchnykh i nauchno-pedagogicheskikh shkol Sankt-Peterburga*. List of scientific and scientific-pedagogical schools of St. Petersburg included in the register of leading scientific and scientific-pedagogical schools of St. Petersburg. Government of St. Petersburg, Committee for Science and Higher Education. 2013. <http://knvsh.gov.spb.ru/closedcontests/view/85/> Date of access 26.05.2020. [In Russian].
2. *Kovalenko V.V., Viktorova N.V., Gaidukova E.V., Gromova M.N., Khaustov V.A., Shevnina E.V. Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke obespechennykh raskhodov proyektiruyemykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri neustanovivshemsya klimate*. Guidelines for assessing the secured costs of designed hydraulic structures in an unsteady climate / Ed. V.V. Kovalenko. St. Petersburg: RSHU. 2010: 51 p. [In Russian].
3. *Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Chistyakov D.V., Hamili A.* Predictive models of the development of processes of catastrophic formation of long-term annual river flow. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2010. 10: 64—69. [In Russian].
4. *Kovalenko V.V. Obespecheniye ustoychivosti modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka metodami chastichno infinitnoy gidrologii*. Ensuring the sustainability of modeling and forecasting river flow using partially infinite hydrology methods. St. Petersburg: RSHU. 2011: 107 p. [In Russian].
5. *Kovalenko V.V., Viktorova N.V., Gaidukova E.V. Modelirovaniye gidrologicheskikh protsessov*. Modeling hydrological processes. Textbook. St. Petersburg: RSHU. 2006: 555 p. [In Russian].
6. *Dominguez E.A. & al.* A Fokker—Planck—Kolmogorov equation-based inverse modelling approach for hydrological systems applied to extreme value analysis. *Journal of Hydroinformatics*. 2017. DOI: 10.2166/hydro.2017.079.
7. *Pungo K.T., Rivera H.G., Bacca J.B.F., Alvarez M.A.L., Rivera M.* Identification of uncertainty in the stochastic process in mean flows in the river Fonce — (San Gil — Santander). *Engineering Research*. 2016. 12(1). <https://www.virtualpro.co/revista/avances-vol-12-num1/4>. [In Spanish].
8. *Diawara H.* Assessment of areas at risk of flooding on the banks of the Niger River in the district of Bamako. *Environmental Sciences*. 2019. 16 (1). [https://www.researchgate.net/publication/337465417\\_EVALUATION\\_DES\\_ZONES\\_A\\_RISQUE\\_D'INONDATION\\_SUR\\_LES\\_BERGES\\_DU\\_FLEUVE\\_NIGER\\_DANS\\_LE\\_DISTRICT\\_DE\\_BAMAKO](https://www.researchgate.net/publication/337465417_EVALUATION_DES_ZONES_A_RISQUE_D'INONDATION_SUR_LES_BERGES_DU_FLEUVE_NIGER_DANS_LE_DISTRICT_DE_BAMAKO). [In French].
9. *Shevnina E., Silaev A.* The probabilistic hydrological MARCSHYDRO (the MARKov Chain System) model: its structure and core version 0.2. *Geoscientific Model Development*. 2019. 12: 2767—2780. DOI: 10.5194/gmd-12-2767-2019.
10. *Kovalenko V.V. Chastichno infinitnaya gidrologiya*. Partially infinite hydrology. St. Petersburg: RSHU. 2007: 230 p. [In Russian].
11. *Kovalenko V.V. Metod kharakteristik v chastichno infinitnoy gidrologii*. Method of characteristics in partially infinite hydrology. St. Petersburg: RSHU. 2012: 136 p. [In Russian].
12. *Kovalenko V.V. Metamorfoz ponyatiy chastichno infinitnoy gidrologii v kontekste destruktzii ontologii M. Khaydeggerom*. Metamorphosis of concepts of partially infinite hydrology in the context of destruction of ontology M. Heidegger. St. Petersburg: RSHU. 2015: 132 p. [In Russian].
13. *Gaidukova E.V. Fraktal'naya diagnostika v modelirovanii gidrologicheskikh protsessov*. Fractal diagnostics in modeling hydrological processes. St. Petersburg: Asterion. 2017: 98 p. [In Russian].
14. *Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Soloviev F.L., Golovanova E.Yu.* Ensuring hydrological reliability of hydraulic structures in regions of unstable formation of long-term river flow. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. Hydraulic engineering. 2013. 2: 38—43. [In Russian].
15. *Kovalenko V.V. Modal'naya neustoychivost' pri formirovanii rechnogo stoka*. Modal instability during river runoff formation. St. Petersburg: RSHU. 2014: 190 p. [In Russian].
16. *Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Kuassi M.K.* The stability of the formation of the probabilistic multi-year regime of river runoff in the Arctic region of Russia. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2014. 36: 7—11. [In Russian].
17. *Kovalenko V.V. Gidrometeorologiya: evolyutsiya v prostranstve ponyatiy*. Hydrometeorology: evolution in the space of concepts. St. Petersburg: RSHU. 2016: 239 p. [In Russian].

18. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Solovyev F.L., Bongu S.E., Jalalvand A. The possibility of accounting evaporation at modeling of formation of river flow (on the example of West Africa). *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2016. 44: 45—53. [In Russian].
19. Gaidukova E.V., Golovanova Ye.YU., Kovalenko V.V. Yavleniye nenulevoy normy mnogoletnikh izmeneniy summarnykh vlagozapasov rechnykh basseynov. The phenomenon of non-zero rate of long-term changes in the total moisture reserves of river basins. St. Petersburg: Asterion. 2019: 104 p. [In Russian].
20. Gaidukova E.V., Shanochkin S.V., Moskalyuk M.A. Accounting for evaporation in the mathematical modeling of river flow. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018. 52: 79—87. [In Russian].
21. Gaidukova E.V., Bongu S.E., Jalalvand A., Diawara. H. Joint assessment of the probabilistic characteristics of long-term river runoff and evaporation in the current climate and its expected changes. *Yevraziyskoye Nauchnoye Ob'yedineniye*. Eurasian Scientific Association. 2018. 7—2 (41): 139—142. [In Russian].
22. Gaidukova E.V., Baimaganbetov A., Sinkpehoun L., Bongu E.S. Scenario estimation of the norm of changes in the total moisture reserves of river basins. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018. 53: 113—122. [In Russian].
23. Dzhahalvand A., Gaidukova E.V. Revealing anomalous zones of river flow formation for water-dependent sectors of the Iranian economy under climate change. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*. Information technologies and systems: management, economics, transport, law. 2019. 2 (34): 71—74. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 08.08.2020  
Принята к публикации 29.08.2020*

### **Сведения об авторах**

**Коваленко Виктор Васильевич**, д-р техн. наук, профессор  
**Гайдукова Екатерина Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, oderiyut@mail.ru  
**Викторова Наталья Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, nata\_vic@mail.ru  
**Хаустов Виталий Александрович**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, vhaustov@rshu.ru  
**Девятков Владимир Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, dafted@mail.ru

### **Information about authors**

**Kovalenko Viktor Vasilevich**, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor  
**Gaidukova Ekaterina Vladimirovna**, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University  
**Victorova Natalia Vladimirovna**, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University  
**Khaustov Vitaly Alexandrovich**, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University  
**Devyatov Vladimir Sergeevich**, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University