

Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 54—70.  
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(70):54—70.

Научная статья  
УДК 556.16.072(282.247.13)  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-54-70

## **Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний стока р. Северной Двины**

*Анатолий Васильевич Фролов, Ирина Владимировна Соломонова*

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, anatolyfrolov@yandex.ru

*Аннотация.* В статье приводятся результаты применения динамико-стохастической модели многолетних колебаний речного стока к исследованию закономерностей многолетних колебаний основных составляющих водного баланса водосбора Северной Двины. Решались прямая и обратная задачи: а) оценка влияния изменений статистических характеристик осадков и испарения на статистические характеристики стока и б) оценка неизвестных дисперсии и коэффициента автокорреляции испарения с водосбора. Речной водосбор рассматривался как гидрологическая система с входными и выходными процессами.

Показанная статистическая неоднородность в многолетних колебаниях составляющих водного баланса водосбора Сев. Двины может быть следствием климатических изменений на водосборе, в том числе вызванных циклической сменой типов атмосферной циркуляции.

*Ключевые слова:* многолетний сток, Северная Двина, моделирование, статистическая неоднородность, осадки, испарение.

*Благодарности.* Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

*Для цитирования:* Фролов А. В., Соломонова И. В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний стока р. Северной Двины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 54—70. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-54-70.

Original article

## **Dynamic-stochastic modeling of the Northern Dvina runoff long-term fluctuations**

*Anatoly V. Frolov, Irina V. Solomonova*

Water Problems Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
anatolyfrolov@yandex.ru

*Summary.* The article presents the results of applying the dynamic-stochastic (DS) model of long-term runoff fluctuations to the study of the patterns of long-term fluctuations in the main components of the water balance of the Northern Dvina catchment. The river catchment is considered as a hydrological system with input and output processes. When constructing a DS model, assumptions are made about the applicability of the models of input processes in the form of the 1st order autoregression processes and direct proportionality of the runoff from the catchment to the effective water storage in the catchment. The DS-model of the

Northern Dvina long-term runoff fluctuations was used to solve direct and inverse problems: a) assessing the effect of changes in the statistical characteristics of precipitation and evaporation on the statistical characteristics of runoff and b) estimating unknown statistical parameters of evaporation from the watershed. It is shown that the variances of the Northern Dvina long-term runoff fluctuations for 1911—1959 and 1960—2008 are statistically different. Long-term fluctuations in river runoff, precipitation, and evaporation over catchment area were considered as implementations of stationary random processes with different statistical parameters over the selected time intervals. Statistical heterogeneity in long-term fluctuations of the components of the Northern Dvina catchment water balance may be a consequence of climatic changes over the catchment, including those caused by a cyclical change in the types of atmospheric circulation — zonal and meridional transport of air masses.

A similar change in variances, sign of the autocorrelation coefficient and the constancy of the average values in the series of river catchment water balance components were revealed on different time intervals identified for the rivers Mezen (g.s. Malonisogorskaya) and Pinega (g.s. Kulogor) closest to the Northern Dvina basin.

*Keywords:* long-term runoff, Northern Dvina, modeling, statistical heterogeneity, precipitation, evaporation.

*Acknowledgments.* This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001.

*For citation:* Frolov A. V., Solomonova I. V. Dynamic-stochastic modeling of the Northern Dvina runoff long-term fluctuations. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(70):54—70. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-54-70.

## Введение

Относительно недавно в многолетних колебаниях годовых величин речного стока были выявлены достаточно длительные временные интервалы, для которых статистические характеристики стока могут заметно различаться. Формально, при длительности таких интервалов 30 лет и более, согласно определению ВМО, можно говорить о климатических изменениях стока (в техногенно ненарушенных естественных условиях). Исследование влияния режимных характеристик основных составляющих водного баланса водосбора — осадков и испарения как непосредственной причины изменения статистических характеристик речного стока — представляет собой предмет данного исследования.

Актуальность темы обосновывается необходимостью совершенствования моделирования многолетних колебаний речного стока. Долгое время многолетний речной сток моделировался простым марковским процессом, причем в рамках чисто статистического моделирования, вне связи с основными стокоформирующими процессами — осадками и испарением по водосбору. При таком подходе невозможно объяснить особенности многолетнего стока некоторых рек, например, отрицательную автокорреляцию стока и причины изменчивости стохастической структуры модели стока на длительных интервалах времени. Применение динамико-стохастических моделей многолетнего процесса речного стока в определенной степени дает ответы на эти вопросы.

Для достижения поставленной цели мы используем представление речного водосбора в виде динамико-стохастической (ДС) гидрологической системы с входными процессами — осадками и испарением по водосбору и выходными процессами — речным стоком с водосбора и эффективным (т. е. участвующим в формировании речного стока) влагозапасом на водосборе. Такой подход

позволяет получить целостное представление о функционировании речного водосбора, учитывающее связи (функциональные и стохастические) между основными составляющими водного баланса.

Примерно до 70-х годов прошлого столетия в гидрологии доминирующим было представление о природных многолетних колебаниях речного стока как о стационарном случайном процессе. К числу первых исследователей, обративших внимание на возможность нестационарности гидрометеорологических процессов, относятся Б. Мандельброт и Дж. Уоллис, назвавшие длительные интервалы времени с экстремальными (минимальными и максимальными) осадками «эффектом Иосифа» [1] и предложившие соответствующие математические модели. К настоящему времени накопились относительно длительные ряды наблюдений за речным стоком и другими гидрометеорологическими процессами, что расширило наше представление о возможных нарушениях стационарности процессов. Во-первых, нестационарность на всем интервале наблюдений за процессом может быть обусловлена наличием тренда. Во-вторых, на отдельных интервалах времени процесс может выглядеть как стационарный, однако статистические характеристики процесса (или некоторые из них) для этих интервалов значительно различаются. При этом возможны ситуации, когда процесс на интервалах наблюдений стационарен по одним моментам распределения и нестационарен по другим [2—5].

Например, нестационарность по отношению к математическому ожиданию обнаружена в ряде наблюдений за наводнениями на р. Нил за 622—1469 гг. Продолжительность маловодных и многоводных интервалов времени, в течение которых многолетние изменения отметок нильских наводнений могут рассматриваться как стационарные случайные процессы, достигала примерно полутора столетий. В работе [6] приведены результаты анализа месячных индексов засухи (PDSI) для штата Иллинойс (США), показывающие выраженную нестационарность по средним и дисперсиям для интервалов 1950—1967 и 1968—1985 гг.

Оценка такого рода изменений обычно проводится в рамках квазистационарного приближения, т. е. в предположении о стационарности процесса на сравнимых временных интервалах. В этом смысле показательна работа П. Гройсмана с коллегами [7], в которой анализируются изменения вероятностей ливневых осадков как индикаторов климатических изменений. Авторы этой статьи сравнили вероятности ливневых осадков для «прошлого» и «будущего» климата, как следствие изменения средних величин осадков, и получили вывод о том, что изменение математического ожидания осадков приводит к существенному изменению вероятностей осадков (при прочих равных условиях). Возможно и менее очевидное проявление нестационарности процесса, например, изменение экстремальных характеристик процесса при изменении его средней величины (или линейной функции от этой величины) [8].

Научная новизна наших результатов состоит в получении полного набора функциональных зависимостей между статистическими характеристиками стока Сев. Двины, осадков и испарения на водосборе. При этом, из-за отсутствия многолетних наблюдений за испарением, соответствующие дисперсия и коэффициент

автокорреляции компонент водного баланса получены как решение системы уравнений, связывающих статистические характеристики основных составляющих водного баланса водосбора.

Достоверность полученных результатов базируется, во-первых, на применении физически обоснованной модели многолетних колебаний стока — стохастического разностного уравнения водного баланса, во-вторых, на применении современных математических методов обработки и анализа используемой гидрологической информации.

Прикладная значимость полученных результатов определяется возможностью их применения для расчетов речного стока с водосбора при решении различных практических задач: имитационного моделирования стока, получения прогностических характеристик речного стока при климатически измененных осадках и испарения, для исследования распространения загрязняющих веществ со стоком и т.д.

### Методика исследования

В соответствии с поставленной целью динамико-стохастического моделирования водного баланса водосбора, были проанализированы ряды годовых величин речного стока Сев. Двины (ст. Усть-Пинега) и годовых слоев осадков на водосбор этой реки.

Информационной основой проведенных исследований послужил созданный нами архив годовых значений многолетних инструментальных наблюдений за стоком и атмосферными осадками. Данные по стоку реки за 1881—1999 гг. были получены на основе R-ArcticNET V4.0, за 2000—2008 гг. — ArcticRIMS. Осадки на водосборе получены на основе данных KNMI Climate Explorer (является частью регионального климатического центра Всемирной метеорологической организации). Нами были рассчитаны годовые суммы осадков на каждом из доступных постов по всей площади водосбора Сев. Двины, а затем осреднены. Полученные данные сравнивались с надежным рядом осадков (модульные величины), полученные Ф. З. Батталовым для района, примерно совпадающим с бассейном Сев. Двины [9]. Коэффициент корреляции между осадками по Ф. З. Батталову и рассчитанными нами осадками по бассейну за 1891—1962 гг. составляет  $r = 0,80$ , что указывает на удовлетворительное согласие между этими данными.

Сток Сев. Двины не зарегулирован, изъятия из стока незначительны, поэтому режим стока этой реки можно считать практически не искаженным прямым техногенным воздействием [10—12].

Для выявления нестационарности в многолетних колебаниях стока Сев. Двины анализировались ряды наблюдений за 1891—2008 гг. Были построены графики скользящих 50-летних отрезков исходного ряда, для которых вычислялись средние значения, дисперсии и коэффициенты автокорреляции. Выбор 50-летнего интервала усреднения, в отличие от обычно рекомендуемого ВМО 30-летнего, обосновывался необходимостью получения более надежных оценок статистических характеристик осадков и стока Сев. Двины. Для оценки средних величин можно

использовать и 30-летний интервал, однако, для оценки дисперсий и коэффициентов автокорреляции желательны более длительные интервалы.

Нами были проанализированы несколько интервалов наблюдений различной длительности. Наибольшие различия имеют место для оценок дисперсий и коэффициентов автокорреляции, приходящихся на 1911—1959 и 1960—2008 гг. (в дальнейшем I и II интервалы соответственно), поэтому эти интервалы использовались в наших исследованиях (рис. 1).

Графики на рис. 1 показывают, что среднее значение стока было практически постоянно на всех отрезках интервала наблюдений. Качественно похожий ход среднеквадратического отклонения (СКО) и коэффициентов автокорреляции осадков и стока Сев. Двины указывает на уменьшение коэффициента автокорреляции за счет более быстрого, по сравнению с дисперсией, уменьшения ковариации. Другими словами, имеет место уменьшение линейной зависимости между смежными значениями каждого из названных выше процессов.

От I ко II интервалу дисперсия осадков на водосбор уменьшилась в 1,6 раза, стока Сев. Двины — в 1,8 раза, отношения средних осадков и стока равны 1,0 и 1,1, соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики процессов на водосборе Сев. Двины  
Statistical characteristics of the processes in the catchment area of the Northern Dvina

Процесс	Характеристика					
	Среднее, мм/год		Дисперсия, (мм/год) <sup>2</sup>		Коэффициент автокорреляции	
	I	II	I	II	I	II
Осадки	557 (±9)	575 (±7)	4172	2688	0,27 (±0,14)	-0,16 (±0,14)
Сток Сев. Двины	306 (±9)	289 (±7)	3951	2247	0,43 (±0,14)	-0,05 (±0,14)

*Примечание.* Интервалы: I — 1911—1959 гг., II — 1960—2008 гг.

Таким образом, за исключением практически неизменных средних величин (на ~3 % осадки и на ~6 % сток), остальные статистические характеристики многолетних колебаний стока р. Сев. Двины и осадков в ее бассейне для 1911—1959 гг. и 1960—2008 гг. заметно различаются. Дисперсии осадков и стока уменьшились (на ~36 и ~43 %, соответственно), коэффициенты автокорреляции осадков и стока на первом сдвиге уменьшились, округленно, от 0,3 и 0,4, до слабоотрицательных. Различия этих параметров, отвечающих указанным интервалам времени, значимы на уровне 95 %.

Выявление непосредственной причины различия статистических характеристик стока для этих интервалов представляет предмет нашего исследования. При этом нам приходится решать «обратную гидрологическую задачу» («doing hydrology backward», [13, 14]), т. е. по статистическим характеристикам речного стока и осадков находить соответствующие характеристики испарения. Для этого используются решения системы уравнений Фридмана—Келлера (см., например, [15]), образованных аналитическими зависимостями между статистическими

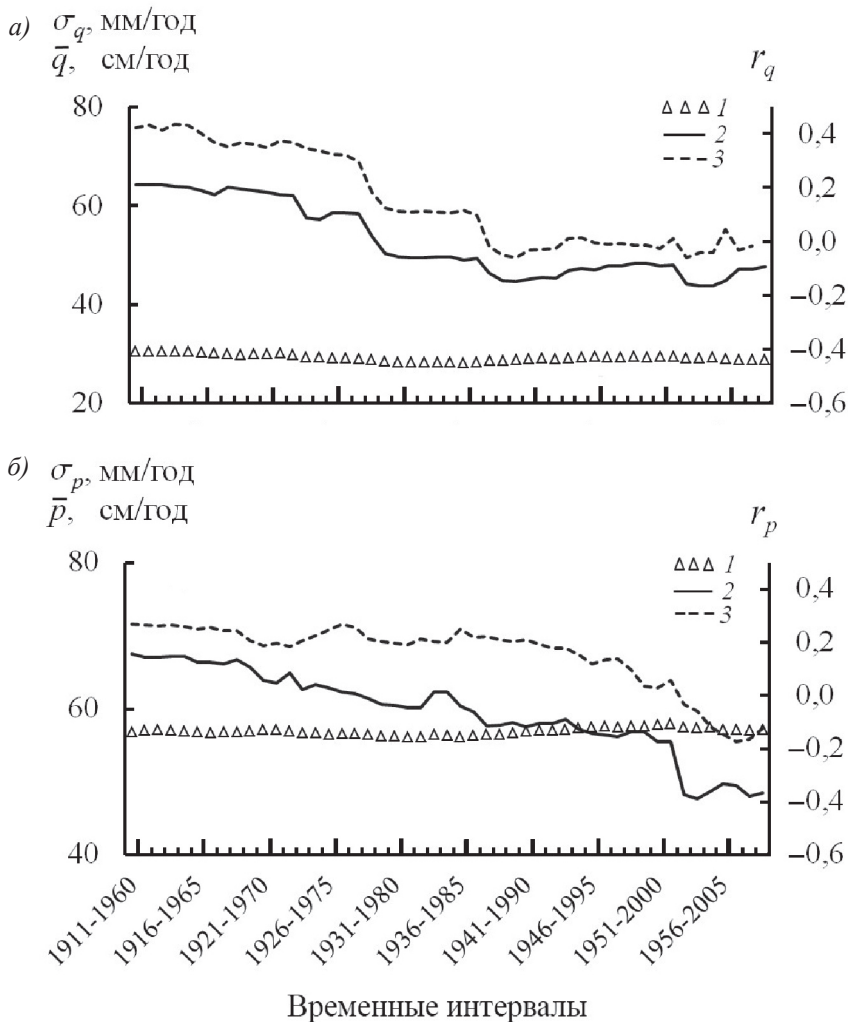


Рис. 1. Статистические характеристики 50-летних скользящих средних годовых значений стока Северной Двины на ст. Усть-Пинега (а) и годовых сумм осадков над речным водосбором (б).

На (а) и (б): 1 — средние арифметические стока ( $\bar{q}$ ) и осадков ( $\bar{p}$ );  
 2 — стандартные отклонения стока ( $\sigma_q$ ) и осадков ( $\sigma_p$ ); 3 — коэффициенты автокорреляции на первом сдвиге стока ( $r_q$ ) и осадков ( $r_p$ ).

Fig. 1. Statistical characteristics of 50-year moving average annual runoff values of the Northern Dvina at g.s. Ust-Pinega (a) and annual precipitation over the river catchment (b).

On (a) and (b): 1 — mean of river runoff ( $\bar{q}$ ) and precipitation ( $\bar{p}$ ); 2 — standard deviation of river runoff ( $\sigma_q$ ) and precipitation ( $\sigma_p$ ); 3 — autocorrelation coefficient at the first shift of river runoff ( $r_q$ ) and precipitation ( $r_p$ ).

характеристиками входных и выходных процессов динамико-стохастической модели многолетних колебаний речного стока.

Применение системы уравнений Фридмана—Келлера обусловлено следующими обстоятельствами. Достаточно длительные наблюдения за многолетними колебаниями испарения с речных водосборов, в том числе и с водосбора Сев. Двины, чаще всего, отсутствуют. Средне многолетняя величина испарения легко находится из уравнения водного баланса (в предположении стационарности его компонентов). Однако, восстановить ряд годовых величин испарения по уравнению водного баланса водосбора невозможно, поскольку для замыкания этого уравнения необходима неизвестная функциональная зависимость между стоком  $Q_t$  и эффективным влагозапасом  $w_t$  на водосборе,  $Q_t = Q(w_t)$ . В первом приближении мы используем предположение о допустимости линейной зависимости  $Q_t = \alpha w_t$ ,  $\alpha$  — числовой коэффициент, однако, получить величину  $\alpha$  в результате наблюдений практически невозможно. Поэтому мы решаем систему из трех уравнений, связывающих дисперсии, коэффициенты автокорреляции и коэффициенты взаимной корреляции стока, осадков и испарения. Эта система нелинейных уравнений замкнута, что и позволяет решить ее численно для трех неизвестных — коэффициента  $\alpha$ , дисперсии и коэффициента автокорреляции многолетних колебаний испарения с водосбора. Идея о применении подобной системы для получения оценок неизвестных статистических характеристик моделируемого процесса была предложена А. А. Фридманом и Л. В. Келлером в статье, опубликованной в 1924 г.

### **Моделирование многолетних колебаний стока Сев. Двины. Основные уравнения и соотношения**

Используемая модель многолетних колебаний речного стока относится к классу концептуальных моделей, получивших широкое распространение в гидрологии ([16—18] и другие). Мы рассматриваем речной водосбор как динамико-стохастическую систему с входными процессами — осадками и испарением на территории водосбора, и выходными процессами — речным стоком с водосбора и эффективным влагозапасом. Предполагается, что между компонентами водного баланса водосбора существуют связи: функциональная — между стоком с водосбора и влагозапасом, и стохастическая — между стоком, осадками и испарением.

Динамическая составляющая ДС-системы описывается уравнением водного баланса водосбора. Стохастичность ДС-системы есть следствие стохастичности составляющих водного баланса. Так же, как и сток с водосбора, колебания эффективного влагозапаса на водосборе рассматриваются выходным процессом в силу функциональной зависимости от изменения речного стока.

Уравнение, описывающее изменения влагозапаса на водосборе, в общем случае имеет вид:

$$w_t = w_{t-1} + p_t - e_t - Q_t(w_t), \quad (1)$$

$w_t$  — эффективный влагозапас, т. е. влагозапас, участвующий в формировании речного стока;  $p_t$  и  $e_t$  — осадки и испарение на водосборе;  $Q_t$  — речной сток с водосбора



как функция эффективного влагозапаса  $w_t$ ;  $t$  — время (годы). Зависимость  $Q_t(w_t)$  «... является фундаментальным свойством водосбора. Понимание того, что контролирует эту зависимость, лежит в основе науки о водосборном бассейне» [19].

Все величины в уравнении (1) отнесены к площади водосбора, поэтому имеют размерность слоя. В дальнейшем, для краткости,  $w_t$  будем называть просто влагозапасом. Уравнение (1) используется как концептуальная модель водосбора [13, 14, 19—21].

В предположении, что сток  $Q_t$  с водосбора прямо пропорционален величине  $w_t$ , т. е.  $Q_t = \alpha w_t$ , уравнение (1) принимает вид:

$$w_t = w_{t-1} + p_t - \alpha w_t - e_t. \quad (2)$$

Из уравнения (2), с учетом зависимости  $Q_t = \alpha w_t$ , получаем уравнение, описывающее многолетние колебания речного стока с водосбора:

$$Q_t = \beta Q_{t-1} + \alpha \beta (p_t - e_t), \quad (3)$$

где  $\beta = 1/(1 + \alpha)$ ;  $t$  — время (годы).

В качестве моделей процессов многолетних колебаний осадков  $p_t(t)$  и испарения  $e_t(t)$  используем марковские (авторегрессионные) негауссовы последовательности первого порядка, АР(1):

$$p_t = \rho_p p_{t-1} + n_{p,t} \quad (4)$$

и

$$e_t = \rho_e e_{t-1} + n_{e,t}, \quad (5)$$

где  $\rho_p$  и  $\rho_e$  — коэффициенты автокорреляции осадков и испарения;  $n_{p,t}$  и  $n_{e,t}$  — белые шумы, причем процессы  $p_t$  и  $e_t$  взаимно коррелированы с коэффициентом  $r_{pe}$ .

Авто- и взаимная корреляции процессов  $p_t$  и  $e_t$  существенно влияет на статистические характеристики речного стока — дисперсию, автокорреляционную функцию и другие.

Взаимная корреляция между компонентами водного баланса водосбора отражает физико-географические условия формирования речного стока. Например, высокая корреляция между испарением и осадками характерна для водосборов, расположенных в аридной зоне, для водосборов же гумидной зоны эта корреляция мала [22]. Результаты оценки взаимной корреляции между речным стоком и осадками на водосбор для ряда рек в Китае приведены в работе [23]. Например, для водосборов крупных рек Китая (Янцзы, Желтая и др.) статистически значимые коэффициенты взаимной корреляции находятся в интервале от 0,39 до 0,85. Информация о величинах коэффициента взаимной корреляции между осадками и стоком рек представляется полезной, поскольку этот коэффициент используется при решении уравнений Фридмана—Келлера.

Система стохастических разностных уравнений (3)—(5) представляет собой динамико-стохастические модели многолетних колебаний влагозапаса на водосборе и речного стока. Без уменьшения общности, считается, что все процессы, входящие в уравнения (3)—(5) центрированы, т. е. имеют нулевые математические



ожидания. Система (1)—(3) позволяет получить аналитические зависимости между статистическими параметрами стока и вынуждающих процессов — осадков и испарения [24, 25].

$$R_Q(\tau) = \frac{\alpha^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \left\{ \frac{\sigma_p^2 [(1 - \beta^2) \rho_p^{|\tau|+1} - (1 - \rho_p^2) \beta^{|\tau|+1}]}{(\rho_p - \beta)(1 - \rho_p \beta)} + \frac{\sigma_e^2 [(1 - \beta^2) \rho_e^{|\tau|+1} - (1 - \rho_e^2) \beta^{|\tau|+1}]}{(\rho_e - \beta)(1 - \rho_e \beta)} - \right. \\ \left. - r_{pe} \sigma_p \sigma_e \left[ \frac{[(1 - \beta^2) \rho_p^{|\tau|+1} - (1 - \rho_p^2) \beta^{|\tau|+1}]}{(\rho_p - \beta)(1 - \rho_p \beta)} + \frac{[(1 - \beta^2) \rho_e^{|\tau|+1} - (1 - \rho_e^2) \beta^{|\tau|+1}]}{(\rho_e - \beta)(1 - \rho_e \beta)} \right] \right\}. \quad (6)$$

Полагая  $\tau = 0$ , из (6) получаем формулу для безусловной (т. е. не зависящей от времени) дисперсии стока,  $\sigma_Q^2$ :

$$\sigma_Q^2 = \frac{\alpha^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \left\{ \frac{\sigma_p^2 (1 + \beta \rho_p)}{(1 - \beta \rho_p)} + \frac{\sigma_e^2 [(1 + \beta \rho_e)]}{(1 - \beta \rho_e)} - \right. \\ \left. - r_{pe} \sigma_p \sigma_e \left[ \frac{1 + \beta \rho_p}{(1 - \rho_p^2)(1 - \beta \rho_p)} + \frac{1 + \beta \rho_e}{(1 - \rho_e^2)(1 - \beta \rho_e)} \right] \right\}. \quad (7)$$

Коэффициент автокорреляции речного стока:

$$r_Q = R_Q(1) / \sigma_Q^2, \quad (8)$$

где  $R_Q(1)$  — значение  $R_Q(\tau)$  при  $\tau = 1$ ;  $\sigma_Q^2$  определяется формулой (7).

Коэффициенты взаимной корреляции между стоком с водосбора и осадками  $r_{Qp}$  и между стоком и испарением  $r_{Qe}$  определяются выражениями:

$$r_{Qp} = \alpha \beta (\sigma_p^2 - r_{pe} \sigma_p \sigma_e) / \sigma_Q \sigma_p \quad (9)$$

и

$$r_{Qe} = \alpha \beta (-\sigma_e^2 + r_{pe} \sigma_p \sigma_e) / \sigma_Q \sigma_e. \quad (10)$$

Уравнения (7)—(10) образуют т.н. систему уравнений Фридмана—Келлера, связывающих статистические характеристики входных и выходных процессов моделируемой гидрологической системы — речного водосбора.

### Применение ДС-модели многолетних колебаний речного стока

Система стохастических дифференциальных уравнений (3)—(5), представляющая собой ДС-модель многолетних колебаний речного стока, позволяет решать две задачи. Во-первых, *прямую*, т. е. получать оценки статистических характеристик стока как функций статистических параметров входных процессов. Во-вторых, дает возможность решать *обратную* задачу — по известным параметрам речного стока и одного из входных процессов находить неизвестные характеристики

второго из вынуждающих процессов — обычно, многолетних колебаний испарения с водосбора.

Первая задача может возникнуть при сценарных проекциях режима стока с водосбора в условиях измененного климата. В этом случае используются результаты климатического моделирования — характеристики осадков и испарения на водосборе.

Решение второй задачи, как правило, предшествует решению первой, поскольку позволяет получить правдоподобные оценки многолетних колебаний испарения с крупных водосборов — процесса, для которого почти всегда отсутствуют достаточно длительные ряды наблюдений; одним из редких исключений является работа [26]. Уравнения, образующие систему, решение которой дает основные характеристики испарения — дисперсию и коэффициент автокорреляции, необходимые для построения авторегрессионной модели многолетних колебаний испарения, представляют уравнения Фридмана—Келлера. Такого рода уравнения используются в полуэмпирической теории турбулентности [15, 27].

В табл. 2 приведены статистические характеристики испарения с водосбора Сев. Двины, дисперсия и коэффициент автокорреляции, а также параметр  $\alpha$  из зависимости  $Q_i = \alpha w_p$ , полученные как решение системы уравнений Фридмана—Келлера (7)—(9).

Таблица 2

Оценки статистических характеристик испарения с водосбора Северной Двины  
Estimates of Statistical Characteristics of Evaporation from the N. Dvina Watershed

Процесс	Характеристика							
	Среднее, мм/год		Дисперсия, (мм/год) <sup>2</sup>		Коэффициент автокорреляции		Параметр $\alpha$ , год <sup>-1</sup>	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Испарение	251	286	3176	2270	0,28	-0,31	4,59	4,64

*Примечание.* Интервалы: I — 1911—1959 гг.; II — 1960—2008 гг. Для I и II интервалов коэффициенты взаимной корреляции между стоком и осадками равны 0,75 и 0,56, соответственно.

Параметр  $\alpha$  естественно называть параметром инерционности водосбора, по аналогии с параметром инерционности уровня бессточного озера, предложенного Д. Я. Ратковичем [28]. Величина  $\alpha$  существенно влияет на коэффициент автокорреляции и другие характеристики стока с водосбора. Заметим, что оценки параметра  $\alpha$  для двух интервалов (см. табл. 2) практически совпадают, что указывает на инвариантность  $\alpha$  по отношению к различным сценариям водного баланса. Подтверждение возможной зависимости величины коэффициентов автокорреляции стока одной и той же реки от временных интервалов, на которых коэффициенты вычислялись, содержится, например, в статье [29], посвященной исследованию формирования в стоке серий маловодных и многоводных лет.

Анализ данных в таблицах 1 и 2 позволяет сделать следующие предположения о физических причинах изменений (от I ко II интервалу времени) дисперсии и автокорреляции стока Сев. Двины.

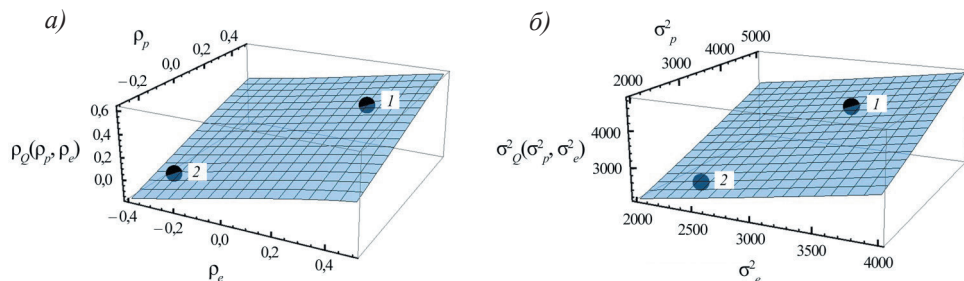


Рис. 2. Зависимости: *a*) коэффициента автокорреляции стока Северной Двины  $\rho_Q(\rho_p, \rho_e)$  как функции двух переменных — коэффициентов автокорреляции осадков  $\rho_p$  и испарения  $\rho_e$  на водосборе; *б*) дисперсии стока Сев. Двины  $\sigma_Q^2(\sigma_p^2, \sigma_e^2)$  как функции дисперсий осадков  $\sigma_p^2$  и испарения  $\sigma_e^2$  на водосборе для 1911—1959 гг.

Точки 1 и 2 на графике (*a*) обозначают коэффициенты автокорреляции стока  $\rho_Q(\rho_p, \rho_e)$  для 1911—1959 гг. и 1960—2008 гг., соответственно; точки 1 и 2 на графике (*б*) обозначают дисперсии  $\sigma_Q^2(\sigma_p^2, \sigma_e^2)$  стока для тех же временных интервалов.

Fig. 2. Dependences: *a*) autocorrelation coefficient  $\rho_Q(\rho_p, \rho_e)$  of N. Dvina runoff as function of two variables — autocorrelation coefficients of precipitation  $\rho_p$  and evaporation  $\rho_e$  over watershed; *б*) variance  $\sigma_Q^2(\sigma_p^2, \sigma_e^2)$  of N. Dvina runoff as function of variances  $\sigma_p^2$  of precipitation and  $\sigma_e^2$  evaporation over watershed for 1911—1959.

Points 1 and 2 on graph (*a*) denote autocorrelation coefficients  $\rho_Q(\rho_p, \rho_e)$  of runoff for 1911—1959 and 1960—2008, respectively; points 1 and 2 on graph (*б*) denote the variances  $\sigma_Q^2(\sigma_p^2, \sigma_e^2)$  of runoff for the same time intervals, respectively.

Уменьшение коэффициентов автокорреляции осадков и испарения приводит к уменьшению автокорреляции стока (рис. 2 *a*); уменьшение дисперсий осадков и испарения вызывает уменьшение дисперсии стока (рис. 2 *б*).

Наша модель несколько уточняет условия корректности физически прозрачного вывода о реакции дисперсии стока на изменения дисперсий осадков и испарения. Предположительно, во многих случаях увеличение (уменьшение) дисперсии осадков (и/или испарения) приводит к увеличению (уменьшению) дисперсии речного стока. Однако, как показывает наша модель, такая реакция дисперсии стока имеет место только «при прочих равных условиях». Если же с уменьшением, например, дисперсии осадков одновременно уменьшается и коэффициент взаимной корреляции между осадками и испарением, то дисперсия стока может, вместо уменьшения, увеличиться.

Изменения в характеристиках осадков и испарения от I интервала ко II привели к уменьшению коэффициента автокорреляции стока Сев. Двины при сдвиге на 1 год практически до нуля.

Таким образом, многолетние колебания испарения с водосбора Сев. Двины для I и II интервалов времени имеют несколько различный характер (рис. 3).

Коэффициенты автокорреляции стока Сев. Двины при сдвиге на 2 года больше по сравнению с той же величиной при сдвиге на 1 год (рис. 3 *a*) для обоих интервалов времени. Однако, эта разница несущественна для автокорреляционной

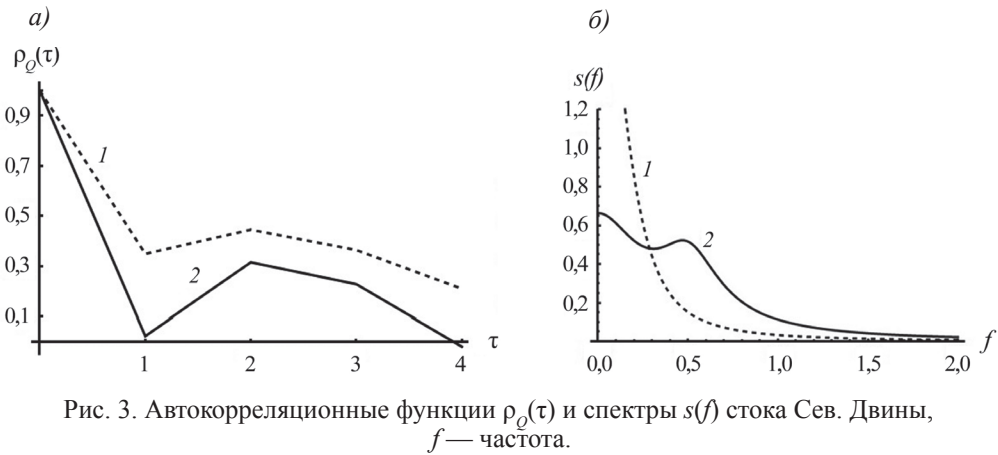


Рис. 3. Автокорреляционные функции  $\rho_0(\tau)$  и спектры  $s(f)$  стока Сев. Двины,  $f$  — частота.

1 и 2 — для условий интервалов 1911—1959 и 1960—2008 гг., соответственно.

Fig. 3. Autocorrelation functions  $\rho_0(\tau)$  and spectra  $s(f)$  of N. Dvina runoff,  $f$  — the frequency.

1 and 2 — for the conditions of the intervals 1911—1959 and 1960—2008, respectively.

функции 1 на рис. 3 а в том смысле, что соответствующий спектр колебаний стока близок к спектру простого марковского процесса (график 1 на рис. 3 б). Примечательно, что аналогичное изменение автокорреляционной функции (превышение 2-го коэффициента автокорреляции над 1-м) имело место для двух интервалов времени для притока в Байкал, впервые выявленное В. Н. Синюковичем с соавторами [30].

Спектр многолетних колебаний стока Сев. Двины для 1960—2008 гг. существенно отличается от спектра для 1911—1959 гг. (графики 1 и 2 на рис. 3 б). Для I интервала времени спектр колебаний стока Сев. Двины близок «красному» шуму, спектр для II интервала показывает смещение энергии колебаний стока в сторону высоких частот [25]. Строго говоря, в рамках нашей ДС-модели многолетние колебания стока с водосбора следует рассматривать как компоненту трехкомпонентного марковского процесса.

Аналогичное изменение величин дисперсий, смена знака коэффициента автокорреляции и неизменность средних значений в рядах составляющих водного баланса речного водосбора была выявлена при выделении соответствующих временных интервалов в ближайших к бассейну р. Сев. Двины рек Мезень (ст. Малонисогорская) и Пинеги (ст. Кулогора) [31]. Выявления похожих статистических неоднородностей в осадках на водосборах этих рек может рассматриваться аргументом для реальности существования нестационарности в стоковых рядах.

Результаты исследования многолетнего стока на 64 створах рек мира (Европы, России, Северной Америки и Австралии), представленные в работе [32] показали, что почти в половине рассмотренных случаев (29 случаев из 64) обнаружены относительно длительные интервалы времени (в основном 50 и более лет), характеризующиеся существенным различием дисперсий многолетнего стока (на 30—60 %).

При этом математические ожидания (средние значения) стока практически не менялись. Во всех этих случаях дисперсия стока рек Северной Америки, Австралии и Европы увеличивалась во втором интервале времени (за исключением четырех рек), в то время как дисперсия стока проанализированных нами рек России вела себя противоположным образом, т. е. уменьшалась. Таким образом, изменение дисперсии в сравнимые интервалы времени, а в некоторых случаях и коэффициента автокорреляции, при практически неизменных средних значениях существует не только в бассейне Сев. Двины, но и в бассейнах других рек мира.

Изменение дисперсии от одного интервала к другому, смена знака коэффициента автокорреляции, сдвиг максимума спектра стока в высокие частоты указывает на возможные климатические причины.

По данным [33] в европейском секторе Северного полушария, в том числе бассейне Сев. Двины, в середине шестидесятых годов XX в. произошла перестройка атмосферы (сменилась циркуляционная эпоха). Отмечавшаяся ранее зональная циркуляция атмосферы (1899—1965 гг.) сменилась на меридиональную (1966 — н.в.). Обнаруженные нами различия дисперсий и коэффициентов автокорреляции в рядах осадков, испарения и стока Сев. Двины, согласуются со сменой одной циркуляционной эпохи на другую.

### Заключение

Динамико-стохастическая модель многолетних колебаний стока Сев. Двины позволяет решать прямую и обратную задачи: а) оценку влияния изменений статистических характеристик осадков и испарения на статистические характеристики стока и б) оценку дисперсии и коэффициента автокорреляции испарения с водосбора. Наша ДС-модель построена в рамках корреляционной теории случайных процессов. Речной водосбор рассматривается как гидрологическая система с входными и выходными процессами. При построении ДС-модели приняты предположения о применимости моделей входных процессов в виде процессов авторегрессии I порядка и о пропорциональности стока с водосбора от эффективного запаса воды на водосборе.

Выявленные изменения режима многолетних колебаний стока и осадков в бассейнах рек Сев. Двина, именно, нестационарность по вторым моментам — дисперсии и коэффициенту автокорреляции, вероятнее всего, связаны с перестройкой общей циркуляции атмосферы, например, с переходом от зонального на меридиональный перенос [33]. Существенное уменьшение дисперсий в рядах стока, осадков и испарения от I интервала ко II-му в стоке Сев. Двины предположительно связано с тем, что при меридиональном переносе атмосферный перенос более стабилен по сравнению с зональным, что приводит уменьшению размаха многолетних изменений осадков [34].

### Список литературы

1. Mandelbrot B. B., Wallis J. R. Noah, Joseph and operational hydrology // Water Resour. Res. 1968. V. 4. No. 5. P. 909—918. doi: 10.1029/WR004i005p00909.

2. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
3. Добровольский С. Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: ГЕОС, 2017. 526 с.
4. Добровольский С. Г., Соломонова И. В. О вековых изменениях параметров стационарности колебаний речного стока // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 123—144.
5. Фролов А. В., Соломонова И. В. Климатическая неоднородность в многолетних колебаниях водного баланса водосбора р. Северной Двины // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Новочеркасск: Лик, 2017. С. 275—281.
6. Smith K., Richman M. Recent hydroclimatic fluctuations and their effects on water resources in Illinois // *Climatic Change*. 1993. V. 24. P. 249—269.
7. Groisman P. Ya., Karl T. R., Easterling D. R. et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change // *Climatic Change*. 1999. V. 42. P. 243—283. doi: 10.1023/A:1005432803188.
8. Бузин В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Палкина Д. А. Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 12—21.
9. Батталов Ф. З. Многолетние колебания атмосферных осадков и вычисление норм осадков. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 183 с.
10. Георгиевский М. В., Горошкова Н. И., Хомякова В. А. и др. Влияние климатических изменений в осенне-зимний период на гидрологический режим рек бассейна Малой Северной Двины // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 466—479. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-466-479.
11. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 30—44.
12. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446—459. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.
13. Kirchner J. W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology // *Water Resour. Res.* 2006. V. 42, No. 3. W03S04. doi: 10.1029/2005WR004362.
14. Kirchner J. W. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-run-off modeling, and doing hydrology backward // *Water Resour. Res.* 2009. V. 45, No. 2. W02429. doi:10.1029/2008WR006912.
15. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.
16. Klemesš V. Physical based stochastic hydrologic analysis // *Advances in Hydroscience*. 1978. V. 11. P. 285—356. doi: 10.1016/B978-0-12-021811-0.50010-3.
17. Klemesš V. The essence of mathematical models of reservoir storage // *Canadian journal of civil engineering*. 1982. V. 9, No. 4. P. 624—635. doi: 10.1139/l82-072.
18. Meert P., Nossent J., Vanderkimpfen P. et al. Development of conceptual models for an integrated catchment management: Subreport 1 – Literature review of conceptual models structures. Antwerp., Belgium: Flanders Hydraulics Research, 2014. 83 p.
19. Creutzfeldt B., Troch P. A., Güntner A. et al. Storage-discharge relationships at different catchment scales based on local high-precision gravimetry // *Hydrological Processes*. 2014. V. 28, No. 3. P. 1465—1475. doi: 10.1002/hyp.9689.
20. Botter G., Porporato A., Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. Nonlinear storage-discharge relations and catchment streamflow regimes // *Water Resour. Res.* 2009. V. 45, No. 10. W10427. doi:10.1029/2008WR007658.
21. Teuling A. J., Lehner I., Kirchner J. W., Seneviratne S. I. Catchments as simple dynamical systems: Experience from a Swiss prealpine catchment // *Water Resour. Res.* 2010. V. 46, No. 10. W10502. doi:10.1029/2009WR008777.
22. Давыдов Л. К. Водоносность рек СССР. Ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. Л.: Гидрометеоиздат, 1947. 161 с.
23. Zhang Z., Chen X., Xu C.-Y. et al. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years // *Journal of Hydrology*. 2011. V. 409, No. 1–2. P. 81—93. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.041.



24. Фролов А. В. Дискретная динамико-стохастическая модель многолетних колебаний речного стока // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 5. С. 538—547.
25. Фролов А. В. Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов // Доклады академии наук СССР. 2014. Т. 458, № 3. С. 345—348. doi: 10.7868/S0869565214270188.
26. Голубев В. С., Сперанская Н. А., Цыцунко К. В. Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб: Гидрометеиздат, 2003. С. 35—53.
27. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложение к геофизической гидродинамике. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 207 с.
28. Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткович Д. Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
29. Раткович Д. Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа регулирования речного стока // Труды ГГИ. 1970. Вып. 180. С. 179—293.
30. Синюкович В. Н., Сизова Л. Н., Курбатова Н. Н., Шимараев М. Н. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 57—63.
31. Соломонова И. В., Фролов А. В. Статистические неоднородности в водном балансе крупных рек Архангельской области // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы II Всероссийской научно-практической конференции приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования Иркутского государственного университета. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. С. 241—248.
32. Соломонова И. В. Статистические неоднородности в рядах годового стока рек // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: тр. II Всерос. конф. СПб.: Химиздат, 2018. С. 594—597. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://mgo-spb.ru/f/190iv\\_solomonova.pdf](http://mgo-spb.ru/f/190iv_solomonova.pdf). (дата обращения: 21.10.2022).
33. Кононова Н. К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899—2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 108—123. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-108-123.
34. Восканян К. Л., Иванова Т. И., Кузнецов А. Д. и др. Анализ смены периодов климатической стабильности северной территории России // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 207—220. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220.

## References

1. Mandelbrot B. B., Wallis J. R. Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resour. Res.* 1968;4(5):909—918. doi: 10.1029/WR004i005p00909.
2. Dobrovolskiy S. G. *Global'nyye izmeneniya rechnogo stoka = Global changes in river runoff*. Moscow: GEOS, 2011: 660 p. (In Russ.).
3. Dobrovolskiy S. G. *Global'naya gidrologiya. Protsessy i prognozy = Global hydrology. Processes and forecasts*. Moscow: GEOS, 2017: 526 p. (In Russ.).
4. Dobrovolsky S. G., Solomonova I. V. On secular changes in the parameters of stationarity of fluctuations in river runoff. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2018;(53):123—144. (In Russ.).
5. Frolov A. V., Solomonova I. V. Climatic heterogeneity in long-term fluctuations in the water balance of the catchment of the river. Northern Dvina. *Water resources: new challenges and solutions*. Novocherkassk: Lik, 2017: 275—281. (In Russ.).
6. Smith K., Richman M. Recent hydroclimatic fluctuations and their effects on water resources in Illinois. *Climatic Change*. 1993;(24):249—269.
7. Groisman P. Ya., Karl T. R., Easterling D. R. et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*. 1999;(42):243—283. doi: 10.1023/A:1005432803188.
8. Buzin V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V., Palkina D. A. Dependencies for forecasting the maximum jam levels of water in the Sukhona, the South and the Lesser Northern Dvina and the influence of



- climatic and anthropogenic factors on them. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2014;(36):12—21. (In Russ.).
9. Battalov F. Z. *Mnogoletniye kolebaniya atmosferykh osadkov i vychisleniye norm osadkov = Long-term fluctuations in atmospheric precipitation and calculation of precipitation norms*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 183 p. (In Russ.).
  10. Georgievsky M. V., Goroshkova N. I., Khomyakova V. A. et al. Influence of climatic changes in the autumn-winter period on the hydrological regime of the rivers of the Malaya Northern Dvina basin. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(64):466—479. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-466-479. (In Russ.).
  11. Gordeeva S. M., Malinin V. N. Using Data Mining in the Problem of Hydrometeorological Forecasting. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2016;(44):30—44. (In Russ.).
  12. Sumachev A. E., Banshchikova L. S. Ice regime of the Pechora River and features of forecasting the highest level of ice drift. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2020;(61):446—459. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459. (In Russ.).
  13. Kirchner J. W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resour. Res.* 2006;42(3):W03S04. doi: 10.1029/2005WR004362.
  14. Kirchner J. W. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rain-fall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resour. Res.* 2009;45(2): W02429. doi:10.1029/2008WR006912.
  15. Monin A. S., Yaglom A. M. *Statisticheskaya gidromekhanika. Ch. 1 = Statistical hydromechanics. Part 1*. Moscow: Nauka, 1965: 639 p. (In Russ.).
  16. Klemeš V. Physical based stochastic hydrologic analysis. *Advances in Hydrosience*. 1978;(11):285—356. doi: 10.1016/B978-0-12-021811-0.50010-3.
  17. Klemeš V. The essence of mathematical models of reservoir storage. *Canadian journal of civil engineering*. 1982;9(4):624—635. doi: 10.1139/182-072.
  18. Meert P., Nossent J., Vanderkimpfen P. et al. Development of conceptual models for an integrated catchment management: Subreport 1 — Literature review of conceptual models structures. Antwerp, Belgium: Flanders Hydraulics Research, 2014: 83 p.
  19. Creutzfeldt B., Troch P. A., Güntner A. et al. Storage-discharge relationships at different catchment scales based on local high-precision gravimetry. *Hydrological Processes*. 2014;28(3):1465—1475. doi: 10.1002/hyp.9689.
  20. Botter G., Porporato A., Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. Nonlinear storage-discharge relations and catchment streamflow regimes. *Water Resour. Res.* 2009;45(10):W10427. doi: 10.1029/2008WR007658.
  21. Teuling A. J., Lehner I., Kirchner J. W., Seneviratne S. I. Catchments as simple dynamical systems: Experience from a Swiss prealpine catchment. *Water Resour. Res.* 2010;46(10):W10502. doi: 10.1029/2009WR008777.
  22. Davydov L. K. *Vodonosnost' rek SSSR. Yeye kolebaniya i vliyaniye na neye fiziko-geograficheskikh faktorov = Water content of the rivers of the USSR. Its fluctuations and the influence of physical and geographical factors on it*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1947: 161 p. (In Russ.).
  23. Zhang Z., Chen X., Xu C.-Y. et al. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years. *Journal of Hydrology*. 2011;409(1–2):81—93. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.041.
  24. Frolov A. V. Discrete dynamic-stochastic model of long-term river runoff variations. *Water Resources*. 2011;38(5):583—592.
  25. Frolov A. V. Estimation of statistical characteristics of long-term fluctuations in evaporation from large river watersheds. *Doklady akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 2014;458(3):345—348. doi: 10.7868/S0869565214270188. (In Russ.).
  26. Golubev V. S., Speranskaya N. A., Tsytunko K. V. Total evaporation in the Volga basin and its variability. *Hydrometeorological aspects of the problem of the Caspian Sea and its basin*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003: 35—53. (In Russ.).
  27. Barenblatt G. I. *Podobiye, avtomodel'nost', promezhutochnaya asimptotika. Teoriya i prilozheniye k geofizicheskoy gidrodinamike = Similarity, self-similarity, intermediate asymptotics. Theory and application to geophysical hydrodynamics*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978: 207 p. (In Russ.).

28. Muzylev S. V., Prival'skiy V. Ye., Ratkovich D. Ya. *Stokhasticheskiye modeli v inzhenernoy gidrologii = Stochastic models in engineering hydrology*. Moscow: Nauka, 1982: 184 p. (In Russ.).
29. Ratkovich D. Ya. Patterns of alternation of low-water and high-water years as the basis for regulating river flow. *Trudy GGI = Proceedings of the GGI*. 1970:(180):179—293. (In Russ.).
30. Sinyukovich V. N., Sizova L. N., Kurbatova N. N., Shimaraev M. N. Features of modern changes in water inflow into Lake Baikal. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and Natural Resources*. 2013:(4):57—63. (In Russ.).
31. Solomonova I. V., Frolov A. V. Statistical inhomogeneities in the water balance of large rivers in the Arkhangelsk region. *Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: materials of the II All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the Department of Hydrology and Environmental Management of Irkutsk State University*. Irkutsk: IGU Publishing House, 2019: 241—248. (In Russ.).
32. Solomonova I. V. Statistical inhomogeneities in the series of annual river runoff. *Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya. tr. II Vseros. konf. = Hydrometeorology and Ecology: Achievements and Development Prospects: Proceedings of the II All-Russian Conference*. St. Petersburg: Himizdat, 2018: 594—597. (In Russ.). Available at: [http://mgo-spb.ru/f/190iv\\_solomonova.pdf](http://mgo-spb.ru/f/190iv_solomonova.pdf). (accessed on: 21.10.2022).
33. Kononova N. K. Types of global atmospheric circulation: results of monitoring and retrospective assessment for 1899—2017. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2018:(3):108—123. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-108-123. (In Russ.).
34. Voskanyan K. L., Ivanova T. I., Kuznetsov A. D. et al. Analysis of the change in periods of climatic stability in the northern territory of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2022:(67):207—220. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-207-220. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Анатолий Васильевич Фролов*, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Отдел динамики водной среды, лаборатория глобальной гидрологии, Институт водных проблем РАН, [anatolyfrolov@yandex.ru](mailto:anatolyfrolov@yandex.ru).

*Ирина Владимировна Соломонова*, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Отдел динамики водной среды, лаборатория глобальной гидрологии, Институт водных проблем РАН, [iren@mail.ru](mailto:iren@mail.ru).

### **Information about authors**

*Anatoly V. Frolov*, Dr. Sci. (Tech.), Chief Scientific Researcher, Department of Aquatic Environment Dynamics, Laboratory of Global Hydrology, Water Problems Institute Russian Academy of Sciences, [anatolyfrolov@yandex.ru](mailto:anatolyfrolov@yandex.ru).

*Irina V. Solomonova*, PhD (Tech. Sci.), Senior Researcher, Department of Aquatic Environment Dynamics, Laboratory of Global Hydrology, Water Problems Institute Russian Academy of Sciences, [iren@mail.ru](mailto:iren@mail.ru).

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 01.02.2023*

*Принята в печать 28.02.2023*

*The article was received on 01.02.2023*

*The article was accepted 28.02.2023*