

8. Кыргызская Республика и регионы. II (598). – Бишкек: Нацстатком КР, 2019. – 60 с.

9. Кыргызстан: краткий статистический справочник. – Бишкек: Нацстатком КР, 2019. URL: <https://stat.kg>.

10. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов Кыргызской Республики за 2007 г. – Бишкек: Нацстатком, 2008. – 24 с.

#### Критерии авторства

Осмонбетова Д.К. выполнила теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право, несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 24.02.2021 г.

Одобрена после рецензирования 22.03.2021 г.

Принята к публикации 05.04.2021 г.

8. Kyrgyzskaya Respublika i regiony. II (598) – Bishkek: Natsstatkom KR, 2019. – 60 s.

9. Kyrgyzstan. Kratkij statisticheskiy spravochnik. – Bishkek: Natsstatkom KR, 2019. // <https://stat.kg>.

10. Ohrana okruzhayushchej sredy i ratsionalnoe ispolzovanie prirodnyh resursov Kyr-gyjskoj Respubliki za 2007 g. – Bishkek: Natsstatkom KR, 2008. – 24 s.

#### Criteria of authorship

Osmonbetova D.K. carried out theoretical studies, on the basis of which she generalized and wrote the manuscript. Osmonbetova D.K. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 23.02.2021

Approved after reviewing 22.03.2021

Accepted for publication 05.04.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504: 556.16

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-124-131

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИТОКА К ВОДОХРАНИЛИЩУ ДЛЯ СРЕДНЕСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА

**ВЕЛИЕВ ИЛЬЯС ГАСАНОВИЧ**<sup>✉</sup>, аспирант  
cpp.sion@gmail.com

**ИЛЬНИЧ ВИТАЛИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, профессор  
vilinitch@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Прянишникова, 12. Россия

*На конкретном примере представлена стохастическая модель стока с пятиступочной дискретностью в пределах водохозяйственных лет. На основе выполненного анализа относительно основных статистических характеристик притока к Краснодарскому водохранилищу сделан вывод о том, что разработанная модель, основанная на простой Марковской цепи, отвечает балансовой точности гидрологических расчетов для оперативного регулирования стока. Проверочные расчеты показали, что предложенная методика получения среднесрочных прогнозов стока на 5 суток, основанная на разработанной стохастической модели стока, в основном удовлетворительна относительно используемого в России критерия эффективности и точности методик гидрологического прогнозирования. На конкретном примере показано, что стохастическая модель стока может быть полезна лицам, принимающим решения относительно оперативного управления водохранилищем в реальном времени.*

**Ключевые слова:** речной сток, водохранилище, регулирование стока, стохастическая модель, гидрологические прогнозы

**Формат цитирования:** Велиев И.Г., Ильнич В.В. Стохастическая модель притока к водохранилищу для среднесрочных гидрологических прогнозов при регулировании стока // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 124-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-124-131.

© Велиев И.Г., Ильнич В.В., 2021

Scientific article

# STOCHASTIC MODEL OF INFLOW TO RESERVOIR FOR MEDIUM-TERM HYDROLOGICAL FORECASTS WHEN FLOW REGULATING

VELIEV ILIYAS GASANOVICH<sup>✉</sup>, post graduate student  
cpp.sion@gmail.com

ILJINICH VITALIJ VITALJEVICH, candidate of technical sciences, professor  
vilinitch@gmail.com

Russian State Agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev», 127434, Moscow, ul. Pryanishnikova, 12. Russia

*The article presents a stochastic model of runoff with a five-day discreteness within the water management years. The analysis performed regarding the main statistical characteristics of the inflow to the Krasnodar reservoir has allowed the conclusion that this model, based on a simple Markov chain, satisfies the balance accuracy of hydrological calculations for operational regulation of the runoff. The performed verification calculations have shown that the proposed method for obtaining medium-term runoff forecasts for 5 days, based on the developed stochastic runoff model, is satisfactory to the criteria of efficiency and accuracy of hydrological forecasting methods used in Russia. The specific example has shown that a stochastic runoff model can be useful to decision-makers regarding the operational management of a reservoir in real time.*

**Keywords:** river runoff, water reservoir, flow regulation, stochastic model, runoff forecast

**Format of citation:** Veliev I.G., Iljinich V.V. Stochastic model of inflow to reservoir for medium-term hydrological forecasts when flow regulating // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – № 2. – S. 124-131. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-124-131.

**Введение.** Большинство водохранилищ мира, обслуживающих в первую очередь оросительные рисовые системы, находится на территориях, где для вегетационного сезона характерно чередование сухих периодов и быстро развивающихся паводков. В таких условиях в функции водохранилищ входят довольно противоречивые задачи: с одной стороны, они должны иметь достаточно большой запас воды для удовлетворения нужд водопользователей в случае предстоящего засушливого сезона, с другой стороны, желательно иметь частично опорожненную полезную емкость для возможности аккумулировать часть катастрофического дождевого паводка. Задача управления такими водохранилищами усложняется ограниченными возможностями оценки прогнозных величин стока: во-первых, на предстоящий длительный маловодный сезон (в случае засушливого лета); во-вторых, получение даже приближенной оценки в «среднесрочной» перспективе (на декаду) значений возможного паводкового стока.

В таких неоднозначных условиях при оперативном управлении водохранилищем в реальном времени приходится управлять лицу, принимающему решения (ЛПР), хорошей помощью которому стали бы долгосрочные гидрологические прогнозы. Однако

при природной неопределенности режима притока такого рода прогнозы настолько недостоверны, что даже чаще всего не выпускаются. Самая большая заблаговременность краткосрочных прогнозов стока реки Кубань, основанных на математических моделях типа «Осадки-сток» и выпускаемых в рамках Росгидромета, составляет 36 ч [1, 2]. Однако в последние годы в рамках международного сотрудничества появилась возможность использования более совершенной системы – EFAS [3, 4], позволяющей получать прогнозы с заблаговременностью 5 суток (пентада). Она в свою очередь использует прогностическую метеорологическую информацию об осадках и температуре воздуха в рамках системы моделей LISTFLOOD [3, 5]. В ряде работ [6, 7] продемонстрирована возможность прогнозировать сток на короткие интервалы времени на основе стохастических моделей.

В работе была поставлена именно цель: разработать стохастическую модель стока с дискретностью 5 суток на основе простого Марковского процесса в дополнение к «генетическому» прогнозу, тем самым увеличив заблаговременность общего прогноза для учета его в имитационной модели управления водохранилищем «ITBalance» [8] при оперативном регулировании стока в реальном времени.

Это в совокупности (прогноз стока на 10 суток + данные решения по модели «IT Balance») должно позволить ЛПР принимать решения с меньшими ошибками. Задачами, позволяющими достичь поставленной цели, являлись:

- определение необходимых статистических характеристик стока с пятисуточной (пентадной) дискретностью и анализ их статистических погрешностей;

- построение стохастической модели стока по типу простого Марковского процесса;

- формирование схемы для получения прогностической величины стока предстоящей пентады;

- проверка эффективности прогностической методики стока согласно традиционному подходу Росгидромета.

Таким образом, используя в представленной модели прогнозную величину притока к водохранилищу на декаду и последующие величины притока по выбранной схеме его внутригодового распределения, можно предоставить более объективную информацию для ЛПР. Это приводит к лучшим результатам регулирования стока.

#### **Материалы и методы исследований.**

В качестве объекта представляемых исследований было выбрано Краснодарское водохранилище на реке Кубань со створом гидроузла в г. Краснодаре, где площадь речного бассейна реки Кубань составляет 58 тыс. км<sup>2</sup>.

Практически для всех моделей управления водохранилищами приходится решать вопросы интервалов – дискретности, причем такой выбор необходимо проводить индивидуально для конкретного водохранилища ввиду необходимости более полного учета процесса формирования стока. Сущность дискретизации заключается в выборе наиболее оптимального временного интервала, в пределах которого сток можно характеризовать осредненным значением за выбранный период. Кроме того, дискретность модели зависит от особенностей поставленной задачи. В различных ситуациях принимаются разные расчетные интервалы модели: год, сезон, лимитирующий и нелимитирующий период, месяц, декада, пентада, сутки и даже часы.

Г.Х. Исмаилов для расчета противопаводковой емкости в своей работе [9] применял декаду, Б.Л. Бабури [10] – пентаду, Г.П. Шенгелия [11] – сутки. Вопрос о степени схематизации гидрографа был рассмотрен Г.Г. Сванидзе [12] на основе принципа баланса точностей теории моделирования, в соответствии с которой постулируется

соразмерность составляющих погрешностей моделирования, обусловленных:

- упрощением полной математической модели при ее реализации на ПК;

- неточностями численных параметров исходной математической модели;

- различием результатов при статических испытаниях (случайная погрешность).

Модель, построенная согласно принципу баланса точности, считается корректной.

Согласно традиционным требованиям [13-15], выработанным на основе исследований о степени изменений стока внутри суток и ошибок его измерений, определение параметров расчетного гидрографа максимального стока рек с площадями водосбора более 5000 км<sup>2</sup> можно проводить на основе данных о средних суточных расходах воды. Однако при построении модели стока по типу Марковских цепей суточные интервалы и менее продолжительные интервалы практически неприемлемы – хотя бы потому, что в таком случае приходится рассматривать многозвенную Марковскую цепь. Это вынуждает при построении модели стока учитывать множество корреляционных зависимостей, значительно усложняющих алгоритмы расчетов, которые приводят к потере его математической корректности и значительно увеличивают количество вычислений. В связи с этим и на основании ранее проведенных исследований [6] в данном случае за расчетный интервал принята пентада.

В качестве исходных данных приняты суточные расходы воды с 1974 по 2020 гг., из которых выделены 46 водохозяйственных лет – с 1 апреля по 31 марта. В каждом году были сформированы 72 интервала. Кроме пятидневных интервалов, в последних интервалах (май, июль, август, октябрь, январь и март), содержалось 6 дней, а в конце февраля принимался за расчетный интервал в 3 и 4 дня (високосные годы).

Необходимые для стохастической модели по типу простой цепи Маркова средние значения, коэффициенты вариации и коэффициенты корреляции между величинами стока в смежные пентады, характеристики их погрешностей вычислялись на основе метода моментов согласно многократно подтвердившим необходимую корректность расчетам требований СП [13-15]. Результаты представлены в таблицах 1, 2, где  $M$  – внутригодовой номер;  $C_v$  – средний расход пентады за 46 лет;  $C_v$  – ее коэффициент вариации;  $\delta$  – их относительные среднеквадратические ошибки.

Таблица 1

Средние значения ( $\bar{Q}$ ), коэффициенты вариации ( $C_v$ ) и их погрешности ( $\delta$ ) по пентадам

Table 1

Average values ( $\bar{Q}$ ), coefficients of variation ( $C_v$ ) and their error ( $\delta$ ) by pentads

M	$\bar{Q}$	$\delta\bar{Q}$	$C_v$	$\delta C_v\%$	M	$\bar{Q}$	$\delta\bar{Q}$	$C_v$	$\delta C_v\%$	M	$\bar{Q}$	$\delta\bar{Q}$	$C_v$	$\delta C_v\%$
1	410	1,08	0,49	11,59	25	356	0,84	0,38	11,15	49	333	1,52	0,68	12,63
2	415	0,79	0,36	11,07	26	347	0,91	0,41	11,26	50	358	1,64	0,74	12,94
3	472	1,13	0,51	11,69	27	310	0,95	0,43	11,33	51	342	1,58	0,71	12,77
4	517	0,83	0,37	11,13	28	297	1,14	0,51	11,72	52	344	1,61	0,73	12,86
5	543	0,77	0,34	11,03	29	291	1,52	0,68	12,62	53	309	1,49	0,67	12,54
6	545	1,07	0,48	11,57	30	252	1,30	0,59	12,08	54	349	1,61	0,72	12,85
7	542	0,92	0,42	11,29	31	245	1,69	0,76	13,05	55	378	1,37	0,62	12,24
8	559	0,69	0,31	10,91	32	261	1,45	0,65	12,45	56	331	1,18	0,53	11,80
9	633	0,97	0,44	11,37	33	264	1,74	0,78	13,17	57	284	0,97	0,44	11,38
10	678	0,86	0,39	11,18	34	235	1,55	0,70	12,69	58	284	1,05	0,47	11,53
11	691	0,70	0,32	10,93	35	188	1,12	0,50	11,67	59	228	0,97	0,44	11,38
12	718	0,66	0,30	10,87	36	182	1,12	0,50	11,67	60	258	1,22	0,55	11,90
13	799	0,58	0,26	10,78	37	217	1,66	0,75	12,99	61	296	1,15	0,52	11,74
14	735	0,73	0,33	10,98	38	201	1,67	0,75	13,03	62	284	1,31	0,59	12,09
15	719	0,65	0,29	10,86	39	198	1,54	0,69	12,67	63	284	1,08	0,49	11,59
16	712	0,70	0,31	10,93	40	235	1,79	0,80	13,31	64	293	1,29	0,58	12,05
17	752	0,95	0,43	11,33	41	240	1,91	0,86	13,57	65	266	1,07	0,48	11,57
18	719	1,23	0,55	11,92	42	335	2,45	1,10	11,90	66	321	1,42	0,64	12,37
19	663	1,03	0,46	11,49	43	320	1,52	0,68	12,62	67	370	1,54	0,69	12,66
20	590	0,92	0,41	11,28	44	266	1,34	0,60	12,17	68	376	1,43	0,64	12,39
21	538	0,97	0,43	11,37	45	292	1,64	0,74	12,94	69	336	1,09	0,49	11,62
22	478	0,97	0,44	11,37	46	318	1,44	0,65	12,41	70	359	0,98	0,44	10,48
23	453	1,00	0,45	11,43	47	322	1,65	0,74	12,95	71	349	0,80	0,36	10,20
24	408	0,89	0,40	11,24	48	331	1,82	0,82	13,39	72	404	1,08	0,48	10,66

Из таблицы 1 следует, что средние значения имеют совсем небольшую относительную среднеквадратическую – до 2,45%, а у коэффициента вариации максимальна, ошибка составляет 13,57%. Здесь следует отметить: в гидрологических расчетах принято считать, что статистические ряды наблюдений обладают достаточной репрезентативностью, если их относительные среднеквадратические ошибки не превышают относительно средних значений 10%, а относительно коэффициентов вариации – 15%.

Как следует из таблицы 2, несмотря на то, что 5 коэффициентов корреляции между величинами смежных интервалов меньше 0,5 (но больше 0,4), их коэффициент достоверности больше 5, за исключением 61-й декады (4,8), однако эта пентада во временной шкале находится за пределами вегетационного сезона. В целом можно заключить, что у всех пентадных значений коэффициентов корреляции коэффициент достоверности значительно больше 2, что требуется в гидрологических расчетах.

Таким образом все исходные параметры стохастической модели отвечают традиционным гидрологическим требованиям по их точности определения.

Сама модель стока представляется по типу простой Марковской цепи – совокупностью условных функций обеспеченности объемов притока к Краснодарскому водохранилищу, поступающих в пределах выбранных 72 внутригодовых пентадных интервалов с началом водохозяйственного года 1 апреля. Условные статистические параметры кривых обеспеченности вычисляются по формулам:

$$W_{cpM}(W_{M-1}) = W_{cpM} + R_{M-1} \cdot \sigma_M / \sigma_{M-1} \cdot (W_{M-1ysl} - W_{cpM-1}), \quad (1)$$

где  $W_{cpM}$  и  $W_{cpM-1}$  – соответствующие фактические средние значения объемов притока в  $M$ -й и  $(M-1)$ -й интервалы ( $M = 1 \div 72$ );  $\sigma_M$  и  $\sigma_{M-1}$  – фактические среднеквадратические отклонения в  $M$ -й и  $(M-1)$ -й интервалы;  $W_{M-1}$  – условные объемы притока в пределах каждой пентады, назначаемые из логики модели регулирования стока, в данном случае принимавшиеся средневзвешенные значения ординат кривой обеспеченности относительно ее диапазонов:  $P < 25\%$ ;  $25\% < P < 75\%$ ;  $75\% < P < 95\%$ ;  $P > 95\%$ ;  $R_{M-1}$  – коэффициент корреляции между значениями стока за предыдущую и рассматриваемую пентады.

$$C_{V_{M/M-1}} = (C_{V_M} \cdot W_{cpM} / W_{cpM} (W_{M-1})) \cdot (1 - r_{M/M-1}^2)^{0,5}, \quad (2)$$

где, помимо прежних обозначений,  $C_{V_M}$  – соответственно коэффициент вариации за рассматриваемый  $M$ -й интервал.

Коэффициент асимметрии во всех случаях априори принимался равным  $C_s = 2C_v$  как наиболее часто встречающееся соотношение, поскольку для точного его определения не имелось достаточных данных.

По условным параметрам в рамках наиболее часто используемого трехпараметрического закона распределения Крицкого и Менкеля были построены по полученным условным параметрам условные кривые обеспеченности притока для каждой пентады. Пример комплекса таких кривых для пятой пентады апреля представлен на рисунке.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции (R) между величинами стока за пентаду, их погрешности ( $\sigma R$  и  $\delta R\%$ ) и коэффициенты достоверности**

Table 2

**Correlation ratios (R) between runoff values per a pentad, their errors ( $\sigma R$  и  $\delta R\%$ ) and confidence coefficients**

M	R	$\sigma R$	$\delta R\%$	Kд	M	R	$\sigma R$	$\delta R\%$	Kд	M	R	$\sigma R$	$\delta R\%$	Kд
1	0,665	0,050	7,50	13,3	25	0,7	0,04	6,36	15,73	49	0,646	0,053	8,15	12,3
2	0,650	0,052	8,03	12,5	26	0,78	0,03	4,32	23,17	50	0,615	0,057	9,33	10,7
3	0,557	0,066	11,85	8,4	27	0,76	0,04	4,75	21,04	51	0,719	0,042	5,83	17,2
4	0,484	0,077	15,92	6,3	28	0,78	0,03	4,09	24,43	52	0,656	0,051	7,83	12,8
5	0,731	0,040	5,47	18,3	29	0,79	0,03	3,88	25,76	53	0,619	0,057	9,17	10,9
6	0,434	0,084	19,44	5,1	30	0,83	0,02	2,97	33,72	54	0,654	0,052	7,90	12,7
7	0,810	0,028	3,50	28,6	31	0,82	0,03	3,31	30,24	55	0,664	0,050	7,55	13,2
8	0,594	0,061	10,18	9,8	32	0,62	0,06	9,15	10,92	56	0,615	0,057	9,33	10,7
9	0,641	0,054	8,35	12,0	33	0,7	0,04	6,38	15,67	57	0,758	0,036	4,75	21,0
10	0,918	0,012	1,34	74,8	34	0,8	0,03	3,68	27,17	58	0,611	0,058	9,48	10,6
11	0,670	0,049	7,34	13,6	35	0,8	0,03	3,78	26,46	59	0,619	0,057	9,17	10,9
12	0,676	0,048	7,15	14,0	36	0,65	0,05	8,13	12,29	60	0,593	0,061	10,24	9,8
13	0,480	0,078	16,17	6,2	37	0,66	0,05	7,56	13,23	61	0,418	0,087	20,74	4,8
14	0,691	0,046	6,67	15,0	38	0,86	0,02	2,5	39,95	62	0,552	0,067	12,11	8,3
15	0,616	0,057	9,28	10,8	39	0,51	0,07	14,4	6,954	63	0,460	0,081	17,53	5,7
16	0,599	0,060	9,97	10,0	40	0,61	0,06	9,41	10,63	64	0,531	0,070	13,18	7,6
17	0,744	0,038	5,12	19,5	41	0,83	0,03	3,01	33,2	65	0,533	0,070	13,05	7,7
18	0,819	0,027	3,30	30,3	42	0,76	0,04	4,59	21,78	66	0,653	0,052	7,91	12,6
19	0,887	0,017	1,90	52,7	43	0,65	0,05	7,91	12,64	67	0,708	0,043	6,14	16,3
20	0,804	0,029	3,63	27,5	44	0,84	0,02	2,88	34,75	68	0,770	0,034	4,46	22,4
21	0,904	0,014	1,58	63,4	45	0,77	0,03	4,44	22,53	69	0,849	0,022	2,65	37,8
22	0,795	0,031	3,86	25,9	46	0,66	0,05	7,67	13,03	70	0,463	0,080	17,26	5,8
23	0,858	0,021	2,47	40,4	47	0,71	0,04	6,21	16,12	71	0,738	0,039	5,30	18,9
24	0,838	0,024	2,88	34,8	48	0,65	0,05	7,96	12,56	72	0,625	0,056	8,94	11,2

**Результаты и обсуждение.** Таким образом, комплекс условных кривых обеспеченности стока для каждой пентады представляет вероятностную модель притока к Краснодарскому водохранилищу.

Краткосрочный прогноз стока при использовании представленной модели дает возможность оценить вероятность превышения прогнозного притока воды в последующую пентаду в зависимости от стока в предыдущую пентаду с оценкой вероятности превышения. Например, согласно рисунку, если сток в предыдущую пентаду составлял  $W_{M-1, j=3} = 158$  млн м<sup>3</sup>, то с помощью третьей сверху на графике кривой

можно оценить, что с вероятностью 75% сток в пятой пентаде будет не меньше 150 млн м<sup>3</sup>. Соответственно медианный сток будет составлять 181 млн м<sup>3</sup>. Естественно, что в редчайших случаях сток предыдущей декады будет точно соответствовать выделенным на практике условиям, поэтому практически всегда приходится использовать линейное интерполирование.

Медианный сток несущественно отличается от модального (наиболее вероятный диапазон). Определить модальный сток по кривым обеспеченности трудно, поэтому для лица, принимающего решение (ЛПР), при регулировании стока представляется

целесообразным выдавать прогнозный медианный расход (50% обеспеченности) и пониженный сток 75%-ной обеспеченности (возможно, 90%-ной или другой обеспеченности) для принятия решений относительно наполнений и попусков водохранилища.

Примем за наиболее вероятный прогноз приток 50%-ной обеспеченности и проверим его. В качестве показателя эффективности и точности прогнозирования примем традиционный подход Росгидромета [16]: отношение  $S/\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение наблюдаемых пентадных стока величин за имеющиеся 46 лет наблюдений,

а  $S$  – средняя квадратическая погрешность проверочных прогнозных значений. Для рассматриваемого временного интервала характерно отношение  $S/\sigma = 0,618$ . Принято считать, что если такая погрешность меньше 0,75, то методика прогноза считается удовлетворительной. Для большинства пентад (56 из 72) такое условие выполняется. В остальных случаях имеется небольшое превышение – как правило, если в пределах пентады были весьма большие паводковые величины стока, что не представляет риска для появления дефицита воды ни в рассматриваемую пентаду, ни в ближайшие последующие пентады.

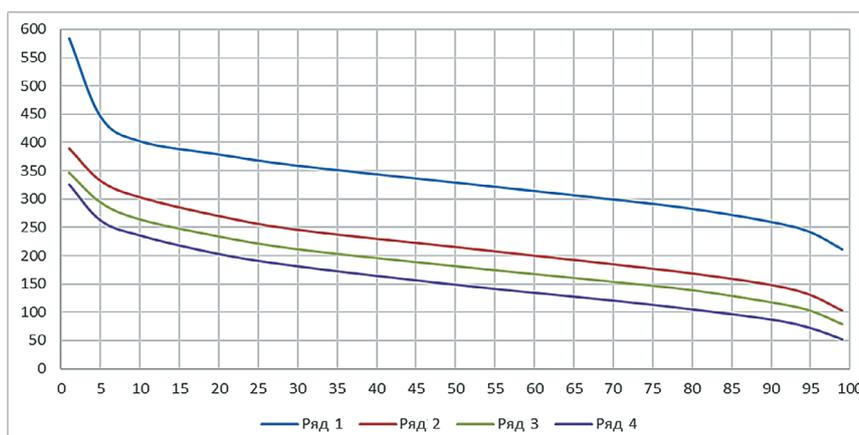


Рис. Условные кривые обеспеченности объемов притока для пятой пентады апреля в зависимости от притока предыдущей пентады:

При условиях: 1)  $W_{M-1,j=1} = 366$  млн  $m^3$  (Ряд 1); 2)  $W_{M-1,j=2} = 211$  млн  $m^3$ ;  
3)  $W_{M-1,j=3} = 158$  млн  $m^3$ ; 4)  $W_{M-1,j=4} = 113$  млн  $m^3$  (Ряд 4)

Fig. Conditional curves of inflow volumes supply for the April's fifth pentad depending on the inflow of the previous pentad

Under conditions: 1)  $W_{m-1,j=1} = 366$  mln  $m^3$  (Series 1); 2)  $W_{M-1,j=2} = 211$  mln  $m^3$ ;  
3)  $W_{M-1,j=3} = 158$  mln  $m^3$ ; 4)  $W_{M-1,j=4} = 113$  mln  $m^3$  (Series 4)

Следует заметить, что при использовании для прогноза значений большей обеспеченности (например, 75%) отношение  $S/\sigma$  увеличивается и чаще всего превышает значение 0,75, однако при этом почти не бывает случаев, когда прогнозируемый сток больше реально наблюдаемого. Это говорит о том, что такая прогнозная величина также должна быть полезной ЛПР для принятия решений в маловодные годы и конкретные маловодные периоды с целью недопущения глубоких дефицитов плановой водоотдачи из водохранилища.

### Выводы

Основные статистические характеристики внутригодового стока по пентадам и их погрешности в целом отвечают балансовой точности гидрологических расчетов для регулирования стока Краснодарским водохранилищем.

Разработанная стохастическая модель стока с дискретностью 5 суток в пределах водохозяйственных лет, основанная на простой Марковской цепи, может быть полезна для лиц, принимающих решения относительно оперативного управления водохранилищем в реальном времени при использовании модели для среднесрочных прогнозов стока.

Предложенная методика получения среднесрочных прогнозов стока на 5 суток является в основном удовлетворительной относительно установленного в России критерия эффективности и точности методик гидрологического прогнозирования.

Лица, принимающие решения относительно наполнений и попусков водохранилища, могут получать прогнозные значения стока на предстоящую пентаду с оценкой вероятности их превышения.

**Библиографический список**

1. **Борщ С.В., Симонов Ю.А.** Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках Кубани / Труды Гидрометцентра России. Вып. 349. – Л.: Гидрометеиздат, 2013. – С. 63-68.
2. **Романов А.В.** Взгляд на региональную европейскую систему предупреждения о наводнениях с учетом партнерских отношений с ней Российской Федерации: ученые записки. – СПб.: РГГМУ, 2019. – С. 176-186.
3. **Raynaud D.A.** Dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe: Evaluation on the 2013 central European floods in Germany / D. Raynaud, J. Thielen, P. Salamon P., Burek S. Anquetin, L. Alfieri // Meteorological Applications. – 2015. – № 22 (3). – P. 410-418.
4. **Park S.** Long-term analysis of gauge-adjusted radar rainfall accumulations at European scale / S. Park, M. Berenguer, D. Semperre-Torres // Journal of Hydrology. – 2019. – 573. – P. 768-777.
5. **Fundel F.** Calibrated precipitation forecasts for a limited-area ensemble forecast system using reforecasts / F. Fundel, A. Walser, M.A. Liniger, C. Frei, C. Appenzeller // Monthly Weather Review. – 2010. – № 138 (1). – P. 176-189.
6. **Ильинич В.В., Светлов Е.А.** Стохастическое моделирование функционирования ирригационного водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство. – 2010. – № 6 – С. 25-27.
7. **Христофоров А.В., Юмина Н.М.** Стохастическая модель колебаний паводочного стока рек Северного Кавказа // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2005. – Т. 7. № 4. – 359-377.
8. **Исмайлов Г.Х., Перминов А.В.** Алгоритм режима работы систем водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования стока // Природообустройство. – 2014. – № 4. – С. 69-73.
9. **Исмайлов Г.Х.** Вероятностные расчеты водохранилищ комплексного (иригационно-противопаводочного) назначения // Водные ресурсы. – 1975. – № 2. – С. 81-94.
10. **Бабурин Б.Л.** Общий случай расчета противопаводочной емкости в водохранилище гидроэлектростанции. / Труды Гидропроекта. Т. 12. – Л.: Гидропроект, 1964. – С. 200-210.
11. **Шенгелия Г.П.** К вопросу о регулировании паводочных гидрографов методом фрагментов // Сообщения АН ГрузССР. – 1972. – № 2. Т. 68. – С. 365-368.

**References**

1. **Borshch S.V., Simonov Yu.A.** Operativnaya sistema kratkosrochnykh gidrologicheskikh prognozov rashody vody na rekah Kubani. Trudy Hidromettsentra Rossii. Vyp. 349. – L.: Gidrometeoizdat, 2013. – S. 63-68.
2. **Romanov A.V.** Vzglyad na regionalnuyu evropejskuyu sistemu preduprezhdeniya o navodneniyah s uchetom partnerskih otnoshenij s nej Rossijskoj Federatsii. Uchebnye zapiski. – SPb.: RGGMU, 2019. – S. 176-186.
3. **Raynaud D., Thielen J., Salamon P., Burek P., Anquetin S., Alfieri L.** A dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe: Evaluation on the 2013 central European floods in Germany // Meteorological Applications. – 2015. – 22(3). – 410-418.
4. **Park S.; M. Berenguer, and D. Semperre-Torres.** Long-term analysis of gauge-adjusted radar rainfall accumulations at European scale. Journal of Hydrology. – 2019. – 573. – P. 768-777.
5. **Fundel F., Walser A., Liniger M.A., Frei C., Appenzeller C.** Calibrated precipitation forecasts for a limited-area ensemble forecast system using reforecasts. Monthly Weather Review. – 2010. – 138(1). – P. 176-189.
6. **Ijinch V.V., Svetlov E.A.** Stokhasticheskoe modelirovanie funktsionirovaniya irrigatsionnogo vodohranilishcha // Melioratsiya i vodnoe hpyzajstvo. – 2010. – № 6 – S. 25-27.
7. **Hristoforov A.V., Yumina N.M.** Stokhasticheskaya model kolebanij pavodochnogo stoka rek Severnogo Kavkaza // Vodnoe hzyajstvo Rossii. Problems, technologies, management. – 2005. – Vol. 7. No. 4. – 359-377.
8. **Ismajylov G.Kh., Perminov A.V.** Algoritm rezhima raboty sistem vodohranilishch sezonnogo i mnogoletnego regulirovaniya stoka // Prirodoobustrojsto. – 2014. – № 4. – S. 69-73.
9. **Ismajylov G.Kh.** Veroyatnostnye raschety vodohranilishch kompleksnogo (irrigatsionno-protivopavodochnogo) naznacheniya // Vodnye resursy. – 1975. – № 2. – S. 81-94.
10. **Baburin B.L.** Obshchij sluchaj rascheta protivopavodochnoj emkosti v vodohranilishche gidroelektrostantsii. Tr. Hidroprojekta. t. 12. – L.: Hidroproekt, 1964. – S. 200-210.
11. **Shengeliya G.P.** K voprosu o regulirovanii pavodochnykh gidrografov meodom fragmentov // Soobshcheniya AN GruzSSR. – 1972. – № 2. – t. 68. – S. 365-368.
12. **Svanidze G.G.** Matematicheskoe modelirovanie gidrologicheskikh ryadov. – L.: Gidrometeoizdat, 1977. – S. 296.

12. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. – Л.: Гидрометиздат, 1977. – С. 296.

13. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.

14. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Изд. 2-е. – СПб.: РГГМУ, 2007. – С. 278.

15. Statistical methods in the Atmospheric Sciences / Ed.R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby // Inter. Geoph. Series. – 2011. – Vol. 1. – Oxford, OX51GB, UK. – 668 p.

16. Георгиевский Ю.М., Шаночкин, С.В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: РГМУ, 2007. – С. 435.

13. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. SP 33-101-2003. – M.: Gosstroj Rossii, 2004. – 72 s.

14. Sikan A.V. Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii. Izd. 2. – SPb.: RGGMU, 2007. – S. 278.

15. Statistical methods in the Atmospheric Sciences / Ed.R. Dmowska, D. Hartman, H.T. Rossby // Inter. Geoph. Series. – 2011. – Vol. 1. – Oxford, OX51GB, UK. – 668 p.

16. Georgievsky Yu.M., Shanochkin S.V. Hidrologicheskie prognozy. – SPb.: RGMU, 2007. – S. 435.

#### Критерии авторства

Велиев И.Г., Ильинич В.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Велиев И.Г., Ильинич В.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов  
Статья поступила в редакцию 15.03.2021 г.

Одобрена после рецензирования 05.04.2021 г.

Принята к публикации 22.04.2021 г.

#### Criteria of authorship

Veliev I.G., Iljinich V.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Veliev I.G., Iljinich V.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 15.03.2021

Approved after reviewing 05.04.2021

Accepted for publication 22.04.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504: 556.16

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-131-140

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА ГИДРОУЗЛОВ

**ИСМАЙЛОВ ГАБИЛ ХУДУШ ОГЛЫ**, д-р техн. наук, профессор  
gabil-1937@mail.ru

**ПЕРМИНОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ** ✉, канд. техн. наук, доцент  
alexperminov@gmail.com

**ИСМАЙЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА**, заведующий лабораторией  
igism37@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская, 49. Россия

*В статье рассматриваются методические подходы к анализу современного состояния проблемы управления водохозяйственными системами в условиях нестационарности многолетнего колебания поверхностных водных ресурсов. Обосновывается применение метода имитационного моделирования для решения водохозяйственных задач. Приводятся основные положения анализа исходной гидрологической информации с целью управления режимом функционирования Волжско-Камского каскада гидроузлов. Формируются методические положения для анализа режима работы сложных водохозяйственных систем, в структуре которых участвует каскад гидроузлов*