

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

с водохранилищами. Анализируются режимы работы Волжско-Камского каскада гидроузлов в условиях различной водности р. Волги. Рассмотренные методологические положения иллюстрируются примерами имитационного моделирования режима работы Волжско-Камского каскада в условиях средней водности. Структура современных водохозяйственных систем и их функционирование представляются как открытая многокомпонентная динамическая система. Конечная цель методики анализа водохозяйственной системы с познанием закономерностей формирования гидрологической системы заключается в разработке формализованных математических моделей функционирования этой системы и исследовании множества альтернативных вариантов при различных природно-хозяйственных условиях.

Ключевые слова: водохранилище, гидроузлы, водохозяйственная система, имитационная система, водные ресурсы, речной сток, статистические параметры, гидрологическая система, климатические характеристики

Формат цитирования: Исмайлов Г.Х., Перминов А.В., Исмайлова И.Г. Методика анализа функционирования сложных водохозяйственных систем на примере Волжско-Камского каскада гидроузлов // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 131-140. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-131-140.

© Исмайлов Г.Х., Перминов А.В., Исмайлова И.Г., 2021

Scientific article

ANALYSIS TECHNIQUE OF FUNCTIONING OF COMPLEX WATER MANAGEMENT SYSTEMS BY THE EXAMPLE OF THE VOLGA-KAMA CASCADE OF HYDRAULIC UNITS

ISMAIYLOV GABIL KHUDUSHEVICH, doctor of technical sciences, professor

gabil-1937@mail.ru

PERMINOV ALEXEY VASILEVICH ✉, *candidate of technical sciences*

alexperminov@gmail.com

ISMAIYLOVA IRINA GABILOVNA, head of laboratory

igism37@mail.ru

Russian State Agrarian University – MAA named after С.А. Timiryazev», 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

The article considers methodical approaches to the analysis of the current state of the management problem of water economic systems under non-stationarity of multi-year fluctuations of surface water resources. Application of the simulation modeling method for solving water management problems is substantiated. The main provisions of the analysis of initial hydrological information to control the operation regime of the Volga-Kama cascade of hydraulic units are given. Methodical provisions for the analysis of the operation regime of complex water management systems with a cascade of hydraulic units with reservoirs in its structure are formed. The operation modes of the Volga-Kama cascade of hydraulic units under the conditions of different water content of the Volga River are analyzed. The considered methodic provisions are illustrated by the examples of simulated modeling of the Volga-Kama cascade operational regime under average water content conditions. The structure of modern water management systems and their functioning is presented as an open multicomponent dynamic system. The ultimate goal of the analysis technique of the water management system with the knowledge of the regularities of hydrological system formation is development of formalized mathematical models of this system functioning and investigation of many alternative variants under different natural-economic conditions.

Keywords: *reservoir, hydraulic units, water management system, simulation system, water resources, river flow, statistical parameters, hydrological system, climatic characteristics*

Format of citation: *Ismailylov G.KH., Perminov A.V., Ismaiylowa I.G. Analysis technique of functioning of complex water management systems by the example of the Volga-Kama cascade of hydraulic units // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 131-140. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-131-140.*

Введение. Интенсификация использования водных ресурсов обусловила формирование в России сложных водохозяйственных систем (ВХС), представляющих совокупность источников водных ресурсов, средств их регулирования и доставки водопользователям, самих водопользователей и средств защиты окружающей природной среды.

В условиях интенсификации резко усложняется сам процесс анализа развития и функционирования сложных ВХС. В этих условиях, наряду с необходимостью разработки новых организационно-правовых аспектов управления сложными ВХС страны, возникает острая необходимость усовершенствования методики гидролого-водохозяйственного анализа и оценки эффективности управления этими системами. Немаловажным, а в настоящее время зачастую и главным, является в этих условиях переход от изучения взаимовлияния отдельных локальных систем и процессов к системному анализу функционирования этих систем в целом на основе применения современных информационно-советующих систем поддержки принятия решений по оптимальному управлению ВХС. Соответственно усовершенствование методики всестороннего анализа закономерностей функционирования сложных ВХС и выбора на этой основе предпочтительных путей их дальнейшего развития с учетом позитивных и негативных последствий их функционирования – задача первостепенной важности.

Методика исследований. ВХС речных бассейнов России – сложные по структуре и комплексные по назначению при доминирующей роли отдельных участников (водоснабжение, энергетика, орошение, судоходство, окружающая среда и др.). Кроме того, они являются стохастическими в самом широком смысле этого слова. Стохастическая суть этих систем обусловлена случайным характером их основного ресурса – речного стока; случайным, а иногда неопределенным характером водопотребления и величин потерь воды в системах; неопределенностью целей их развития [1-5]. Чтобы получить возможность осуществить всесторонний анализ сложной ВХС включая как формальные, так и неформальные аспекты, необходимо перейти к новым концепциям. Таковую возможность создают метод системного подхода и его прикладной аппарат – математическое моделирование, являющееся, по всей вероятности, единственным путем, который соединит в одно целое различные аспекты развития

и функционирования этой системы и упорядочит последовательность ее изучения [6-8].

В структуре этих систем можно выделить три группы элементов, выполняющих различные функции: объекты секторов экономики и население, потребляющие воду (участники ВХС), природные комплексы, в пределах которых формируются водные ресурсы и функционируют водопотребители, водохозяйственные объекты, обеспечивающие забор и распределение воды, включая защиту территории от водной стихии.

Анализ и оценка характера функционирования ВХС в изменяющихся природно-хозяйственных условиях производятся двумя способами. Первый способ заключается в использовании традиционного физико-географического и статистического подхода к решению данной задачи [4, 5]. Такой подход предусматривает проведение анализа пространственной и временной изменчивости природных и хозяйственных факторов в системе по имеющимся рядам наблюдений [9, 10]. Второй способ заключается в применении методологии построения математических моделей протекания природных и хозяйственных процессов в бассейне и решении на этой основе задач анализа и синтеза условий функционирования ВХС [11-14]. Данный способ требует привлечения для своей реализации достаточно сложного математического аппарата, состоящего из комплекса имитационных и оптимизационных моделей [1, 3, 6, 7, 11].

К числу методических основ теории анализа функционирования сложных ВХС в первую очередь относятся анализ и оценка межгодовой и сезонной изменчивости речного стока и климатических (суммарных атмосферных осадков, суммарного испарения суши и изменения бассейновых влагозапасов) факторов. Управление водными ресурсами требует предвидения притока речных вод, в условиях которого призваны работать ВХС. Это предопределяет переход от ретроспективных позиций, сравнительно недавно преобладавших в гидрологии, к активным прогностическим позициям [2, 4, 5, 15, 16]. Именно с этим направлением связано широкое использование методов теории вероятностей и математической статистики для математической интерпретации присущих колебаниям стока вероятностных закономерностей [1, 4, 5, 15-17]. Следовательно, одна из основных задач анализа заключается в том, чтобы раскрыть и количественно выразить межгодовую и сезонную изменчивость речного стока как во времени, так

и по территории, и сделать эти закономерности основой предвидения предстоящего режима водных ресурсов и управления ими.

Анализ временной и пространственной однородности необходимо выполнять при построении эмпирических и аналитических кривых распределения вероятностей ежегодного превышения (кривых обеспеченностей), включая оценку параметров и квантилей распределения, при анализе группировок лет различной водности. Оценка однородности гидрологических характеристик предусматривает использование как гидролого-генетических, так и статистических методов анализа гидрометеорологической информации, которые отражают по сути одно и то же гидрологическое явление и поэтому взаимно дополняют друг друга. Поэтому при использовании статистических методов анализа однородности обнаруженные неоднородности формирования речного стока статистическими методами, как правило, дополняются гидролого-генетическим анализом, раскрывающим физический смысл обнаруженной ранее статистической неоднородности.

Основными генетическими приемами и методами, позволяющими вскрыть неоднородность гидрологических характеристик, могут служить разностные интегральные кривые гидрологических и метеорологических характеристик, суммарные интегральные кривые, совмещенные хронологические графики гидрологических характеристик, построенные по гидрометрическим створам в однородном гидрологическом районе, пространственно-временные корреляционные функции гидрологических и метеорологических характеристик [5, 18, 19].

Следующим этапом в теории анализа функционирования является непосредственно управление самими ВХС и ее структурными элементами. Управление ВХС вообще, и водными ресурсами каскадов водохранилищ комплексного назначения – в частности, представляет собой итеративный процесс интегрированного принятия решений, касающихся использования и охраны водных ресурсов речного бассейна [6, 7, 11,]. Такая форма управления создает возможность для множества водопользователей сбалансировать их противоречивые требования к водным ресурсам как к одному из основных видов природных ресурсов, а также оценить влияние различных видов водопользования на водные объекты и прилегающие к ним территории.

Научно обоснованные правила комплексного использования водных ресурсов водохранилищ являются определяющим фактором для правильного планирования работы действующих и проектируемых каскадов гидроузлов за счет выявления при их разработке наивыгоднейших режимов уровней водохранилищ, режимов попусков воды в нижние бьефы, повышения эффективности работы ГЭС, улучшения условий работы водного транспорта, сельского и рыбного хозяйства в сочетании с обеспечением рекреационных потребностей населения, прилегающих городов и населенных пунктов, существования водных и околоводных экосистем [6, 11, 13, 14, 20, 21].

Результаты исследований. Анализ многолетнего колебания притока р. Волги в створе г. Волгограда за период 1881/82-1994/95 гг. показывает, что наблюдаемый ряд имеет следующие оценки статистических параметров: среднее – 247 км³/год, стандарт – 44,0 км³/год, коэффициент вариации – 0,18, коэффициент корреляции стока смежных лет – 0,40. Для условно-естественного ряда оценки параметров соответственно составляют: 257 км³/год; 45,0 км³/год; 0,18 и 0,43 (табл. 1). Эмпирические кривые обеспеченности в обоих случаях соответствуют трехпараметрическому гамма-распределению при $C_S = 2C_V$.

Поскольку антропогенное воздействие на сток Волги становится ощутимым со второй половины рассматриваемого периода, была осуществлена оценка степени однородности отрезков исходных временных рядов для периода 1934/35-1994/95 гг. ($n = 61$ год). В результате оказалось, что если оценки дисперсии можно считать однородными, то различие в оценках среднего (соответственно 256 и 239 км³/год) (табл. 1) можно считать статистически неоднородным. Это различие еще более очевидно, если сравнивать оценки среднего для отрезков наблюдаемого ряда с 1881/82 по 1933/34 и с 1934/35 по 1994/95 гг. (соответственно 258 и 239 км³/год) (табл. 1). Следовательно, анализируемый ряд фактического годового стока р. Волги у г. Волгограда, в отличие от условно-естественного ряда, в результате воздействия антропогенных факторов в части математического ожидания приобретает черты нестационарности.

Более наглядно масштабы влияния хозяйственной деятельности на сток проявляются при сопоставлении разностных интегральных кривых условно-естественного и наблюдаемого притока р. Волги у г. Волгограда. Интегральное снижение годового

стока р. Волги относительно стокоформирующей части ее водосбора за 60 последних лет составило около 1040 км^3 , или в среднем $17 \text{ км}^3/\text{год}$, то есть около 7% от среднеголетнего условно-естественного стока.

Столь незначительное снижение годового стока свидетельствует о том, что основную роль в формировании стока Волги все еще играют природные факторы, и прежде всего – климатические.

Таблица 1

Основные статистические параметры годового стока р. Волги у г. Волгограда за 1881/82-1994/95 гг.

Table 1

The main statistical parameters of the annual flow of the Volga River near Volgograd for 1881/82-1994/95

Период, число лет <i>Period, number of years</i>	Статистические параметры / <i>Statistical parameters</i>				
	$W_{cp}, \text{ км}^3/\text{год}$ <i>$W_{average} \text{ km}^3/\text{year}$</i>	$\sigma_w, \text{ км}^3/\text{год}$ <i>$\sigma_w, \text{ km}^3/\text{year}$</i>	C_v	C_s	$R(1)$
1. Наблюденный ряд / <i>Observed series</i>					
1881/82-1994/95 гг. n = 114	247	44	0,18	$2C_v$	0,41
1881/82-1933/34 гг. n = 53	258	44	0,17	$2C_v$	0,34
1934/35-1994/95 гг. n = 61	239	4,6	0,18	$2C_v$	0,39
2. Условно-естественный ряд / <i>Conditionally-natural series</i>					
1881/82-1994/95 гг. n = 114	257	45,1	0,18	$2C_v$	0,43
1881/82-1933/34 гг. n = 53	258	44,0	0,17	$2C_v$	0,34
1934/35-1994/95 гг. n = 61	256	46,5	0,18	$2C_v$	0,49
1981/82-1975/76 гг. n = 95	251	43,0	0,17	$2C_v$	0,38
1976/77-1994/95 гг. n = 19	287	43,0	0,15	$2C_v$	0,21

Данные таблицы 1, кроме того, свидетельствуют о наличии статистически достоверной корреляции между годовым стоком смежных лет ($r [1]$) изменяются от 0,34 до 0,49).

Анализ динамики многолетнего колебания притока р. Волги у г. Волгограда позволяет выделить два периода: маловодный – с 1881/1882 по 1975/1976 гг.; многоводный – с 1976/1977 по 1994/1995 гг. Статистические параметры годового притока р. Волги у г. Волгограда для выделенных периодов различаются (табл. 1). Статистическая оценка дисперсии (по критерию Фишера) показала, что $F_{расч} = 1,2 < F_{\alpha=5\%} = 1,78$. Это означает, что рассматриваемый ряд, состоящий из двух периодов, по дисперсии является однородным. Среднеарифметическое объемов годовых значений притока речных вод для рассматриваемых периодов (по критерию Стьюдента) $t_{расч} = 2,95 > t_{\alpha=5\%} = 1,65$ показывает, что рассматриваемый ряд, состоящий из двух периодов, является неоднородным (нестационарным).

Анализ кривых обеспеченности рассматриваемых периодов показал существенные различия между ними. Расхождение в оценках по ним, особенно в зоне больших обеспеченностей, достигают 17-20%. Полученные кривые обеспеченности могут быть использованы для определения

рациональных режимов функционирования Волжско-Камского каскада гидроузлов.

Анализ развития гидрологических процессов в бассейне р. Волги показывает, что в рассматриваемый период им свойственны аномальные маловодные и многоводные годы. При анализе аномальных лет по водности становится очевидным, что наиболее катастрофическими маловодными являются 1940 г., 1910 г., 1937 г., а наиболее многоводными – 1926 г., 1994 г., и 1947 г. Очевидно, что гидрографы этих аномальных лет могут выступать в качестве модели по водности при определении рациональных режимов функционирования Волжско-Камского каскада гидроузлов. В частности, эти модельные гидрографы могут использоваться в качестве расчетного гидрографа для защиты окружающей среды от наводнений и улучшения рыбохозяйственных и экологических условий на участке от г. Волгограда до устья р. Волги.

Управление современным ВХС, включающее в себя такие виды деятельности, как планирование, проектирование, строительство и эксплуатация водохозяйственной инфраструктуры, подразумевает более объемлющий подход к анализу процесса принятия управленческих решений в условиях его функционирования. Создание каскада или систем водохранилищ всегда являлось

главным средством приведения водного режима рек в соответствие с требованиями водопотребителей.

Отличительной особенностью Волжско-Камского каскада водохранилищ является комплексный характер использования их водных ресурсов. Научно обоснованные правила комплексного использования водных ресурсов водохранилищ Волжско-Камского гидроузлов являются определяющим фактором для анализа и оценки их режима функционирования. Для определения наиболее выгоднейших режимов уровней Волжско-Камского гидроузлов водохранилищ, режимов попусков воды в нижние бьефы, повышения эффективности работы ГЭС, улучшения условий работы водного транспорта, сельского и рыбного хозяйства в сочетании с обеспечением культурно-бытовых потребностей населения прилегающих городов и населенных пунктов была использована разработанная нами

имитационная модель «IMIT-BALANC» [6, 13, 14]. По результатам имитационного моделирования определены режимы работы системы, выработаны конкретные количественные предложения по режимам работы всех гидроузлов каскада на планируемый период с возможной разбивкой его на более мелкие (месяцы, декады и др.) интервалы регулирования.

Анализ режимов работы Волжско-Камского каскада водохранилищ показывает, что второй квартал для этого каскада водохранилищ является наиболее ответственным периодом, связанным не только с пропуском весеннего половодья, когда к водохранилищам каскада приходит до 2/3 годового стока Волги, и созданием запасов воды для использования в последующую межень, но и с необходимостью осуществления беспрецедентного по масштабу, ежегодного специального весеннего пуска в низовья Волги по специальному графику.

Таблица 2

Водный баланс Камского (за 2003/2004 гг.) и Иваньковского (за 1999/2000 гг.) гидроузлов средней водности р. Камы и Верхней Волги

Table 2

Water balance of the Kamsky (for 2003/2004) and Ivankovsky (for 1999/2000) hydraulic units of average water content of the Kama and Upper Volga rivers

Дата Date	Камское 2003-2004 г, P р. Камы = 52%, Pприт. вдхр = 51% Kamsky 2003-2004, P r. Kama = 52%, P infl. reserv. = 51%				Иваньковское 1999-2000 г, P р. Волга: 43%, Pприт. вдхр = 27% Ivankovsky 1999-2000, P r. Volga: 43%, P infl. reserv. = 27%			
	Приток Inflow	Сброс Disch	Разн. differ	Модельные отм., м	Приток Inflow	Сброс Disch.	Разн. Differ.	Модельные отм., м
	м ³ /с / m ³ /s				Model marks, m			
01 апр. / 01 Apr.	526	1230	-704	102,77	1637,2	1073,1	564	123,2
11 апр. / 11 Apr.	1261	1710	-449	102,05	2804,5	2504,2	300	124,0
21 апр. / 21 Apr.	5138	3515	1623	101,51	998,4	957,7	41	124,0
01 мая / 01 May	7145	4860	2285	103,20	396,5	503,5	-107	123,5
11 мая / 11 May	10743	6348	4395	104,99	376,9	150,0	227	124,0
21 мая / 21 May	7121	4954	2167	107,55	270,9	197,5	73	124,0
01 июнь / 01 June	3480	3614	-134	108,66	175,8	111,4	64	124,0
11 июнь / 11 June	2989	3003	-14	108,60	142,1	77,8	64	124,0
21 июнь / 21 June	3211	3176	35	108,58	142,9	63,2	80	124,0
01 июль / 01 July	1459	1474	-15	108,59	159,3	81,3	78	124,0
01 авг. / 01 Aug.	704	1245	-541	108,53	124,9	55,6	69	124,0
01 сент. / 01 Sept.	849	1218	-369	107,69	104,9	50,0	55	123,9
01 окт. / 01 Oct.	857	1161	-304	107,07	163,0	76,2	87	124,0
01 ноя. / 01 Nov.	729	1030	-301	106,52	160,2	167,7	-7	123,7
01 дек. / 01 Dec.	498	829	-331	105,88	206,1	192,8	13	123,2
01 янв. / 01 Jan.	458	897	-439	105,20	184,0	172,3	12	122,5
01 фев. / 01 Feb.	436	844	-408	104,22	160,8	192,4	-32	121,0
01 мар. / 01 Mar.	438	873	-435	103,23	236,1	224,3	12	119,5

Как следует из таблицы 2 и рисунка, Камский и Иваньковский гидроузлы являются самыми верхними в Волжском-Камском

каскаде гидроузлов и осуществляют прежде всего внутригодовое перераспределение притока рек Кама и Верхней Волги. В качестве

модели среднего по водности года по р. Каме выбраны 2003/2004 гг., а по Верхней Волге – 1999/2000 гг. При этом если обеспеченность по водности р. Камы в модельный год $P = 52\%$, то обеспеченность притока речных вод к Камскому гидроузлу – $P = 51\%$. В створе Иваньковского гидроузла обеспеченность модельного года 1999/2000 гг. – $P = 27\%$. В целом в Верхней Волге этот год по водности ближе к среднему году и составляет $P = 43\%$. Это свидетельствует о том, что в бассейне р. Волги имеет место асинхронность пространственного распределения притока речных вод к Волжско-Камскому гидроузлу.

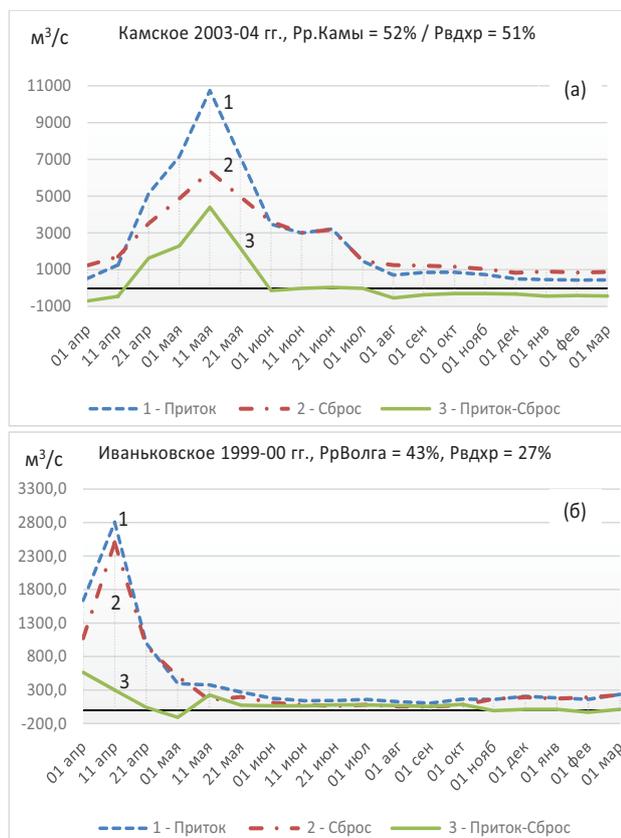


Рис. Режимы работы Камского (за 2003/2004 гг.) (а) и Иваньковского (за 1999/2000 гг.) (б) гидроузлов в средней водности р. Камы и Верхней Волги

Fig. Regimes of the operation of the Kamsky (for 2003/2004) (a) and Ivankovskiy (for 1999/2000) (b) hydraulic units of the rivers Kama and Upper Volga of average water content

Как следует из режима работы Камского гидроузла (табл. 2, рис.) первой и второй декад апреля, сброс в нижней бьеф достигает $1200-1700 \text{ м}^3/\text{с}$ при притоке к Камскому водохранилищу $526-1261 \text{ м}^3/\text{с}$. Это объясняется

тем, что Камский гидроузел участвует, во-первых, в формировании ежегодного специального весеннего попуска в низовья Волги, во-вторых – в поддержании гарантированной судоходной глубины р. Камы в начале навигационного периода. С третьего апреля до конца мая Камское водохранилище наполняется, в июне достигает такого уровня, как нормальный подпорный (проектный) уровень (НПУ). НПУ Камского гидроузла поддерживается до конца августа. Сброс в нижний бьеф в этот период колеблется от $6348 \text{ м}^3/\text{с}$ (май) до $1245 \text{ м}^3/\text{с}$ (август). С третьей декады августа до конца марта Камское водохранилище частично сбрасывается с целью прежде всего поддержания водозаборов вдоль р. Камы, гарантированной судоходной глубины (до конца второй декады ноября), а также зимнего гарантированного гидроэнергетического попуска. В конце марта уровень воды в Камском водохранилище достигает отметки 103 м , то есть отметки перед половодьем.

Таким образом, функционирование Камского гидроузла позволяет срезать половодье со второй декады апреля до первой декады июня (период половодья) и поддерживать высокий уровень как в верхнем, так и в нижнем бьефах летне-осеннего и зимнего периодов, обеспечивая при этом все водозаборы вдоль р. Камы и формируя часть специального весеннего попуска в низовья Волги.

Влияние режима функционирования Иваньковского водохранилища на естественный сток р. Волги по сравнению с Камским водохранилищем на р. Каме является незначительным (рис.). Достаточно отметить, что среднееголетний сток реки Волги в створе Иваньковского гидроузла с учетом попусков из Вышневолоцкой водной системы составляет $9,7 \text{ км}^3/\text{год}$, а р. Камы в створе Камского гидроузла – $54 \text{ км}^3/\text{год}$, то есть в $5,5$ раза больше. Вместе с тем водохозяйственная и экологическая роль Иваньковского гидроузла достаточно велика. Водные ресурсы Иваньковского водохранилища используются в интересах водоснабжения г. Москвы, водного транспорта, обводнения рек Москвы, Клязьмы и их притоков, рыбного хозяйства и энергетики. Кроме того, водные ресурсы Иваньковского водохранилища используются для водоснабжения прилегающих к водохранилищу территорий.

Как следует из таблицы 2, в конце апреля Иваньковское водохранилище наполнено до отметки $124,0 \text{ м}$ (НПУ), а затем несколько сбрасывается до конца октября и достигает отметки НПУ. Следует отметить,

что ежегодное наполнение Иваньковского водохранилища до НПУ является обязательным. В интересах рыбного хозяйства в период половодья многоводных лет уровень воды в водохранилище достигает до отметки 124,2 м. В случае избыточной приточности к водохранилищу наполнение водохранилища сопровождается одновременным осуществлением полной пропускной способности ГЭС. В целом выполненные водохозяйственные расчеты по модельным годам различной водности показывают, что динамика наполнения и сработки Иваньковского водохранилища зависит от величины прогнозируемого объема весеннего половодья.

Водные ресурсы Иваньковского водохранилища в период летне-осенней межени используются для водоснабжения канала имени Москвы. Уровень воды в водохранилище в год средней водности придерживается на отметке 124,0 м с мая до октября. Сработка Иваньковского водохранилища в год средней водности в конце периода навигации (ноябрь) устанавливается на отметке 123,7 м, а в маловодные годы с 95-97%-ной обеспеченностью – на отметке 121,7 м.

В зимнюю межень водные ресурсы Иваньковского водохранилища используются прежде всего для водоснабжения канала имени Москвы и на гарантированные попуски для ГЭС, срабатываясь до отметки 121,0 м (табл. 2). При этом в целях создания наиболее благоприятных условий для рыбного хозяйства сработки Иваньковского водохранилища в январе не допускаются ниже отметки 122,50 м. Сработки водохранилища ниже отметки 122,5 м начинаются с февраля и заканчиваются в конце марта, достигая 119,5 м установленной отметки предполоводной сработки.

Таким образом, проведенные исследования со всей очевидностью показывают, что Иваньковское водохранилище на р. Волге, удовлетворяя требования своих русловых и нерусловых водопользователей,

одновременно обеспечивает безопасность гидротехнических сооружений.

Выводы

1. Интенсификация использования водных ресурсов речного бассейна обусловила формирование сложных водохозяйственных систем в бассейне р. Волги, представляющих совокупность источников водных ресурсов, средства их регулирования, технологии подготовки и доставки воды водопользователям. Вместе с тем водохозяйственная система речного бассейна производит свою продукцию в виде водных ресурсов. В этом отношении водохозяйственная система р. Волги выступает как природоэксплуатирующая ресурсная система. Следовательно, с полным правом водохозяйственную систему можно рассматривать как систему, производящую продукцию (воду) для продажи, то есть как товар рынка.

2. В основе предлагаемой методики гидролого-водохозяйственного анализа закономерностей функционирования водохозяйственных систем заложен новый подход – переход от изучения отдельных локальных систем и процессов к системному анализу функционирования этих систем и использованию прикладного аппарата математического моделирования. Использование взаимосвязанных моделей оптимизационного и имитационного типа разной степени сложности позволяет исследовать множество альтернативных вариантов развития системы при различных природно-хозяйственных условиях и определить наиболее предпочтительные из них.

3. Осуществлена идентификация гидрологических и водохозяйственных процессов, происходящих в водохозяйственной системе р. Волги. Отличительная особенность такого рода идентификации заключается в том, что, помимо природно-климатических факторов, она включает в себя и нормативные показатели хозяйственного использования водных ресурсов рассматриваемой системы.

Библиографический список

1. Болгов М.В., Сарманов И.О., Сарманов О.В. Марковские процессы в гидрологии. / Под ред. академика РАН Хубларяна М.Г. – М.: Ин-т водных проблем РАН, 2009. – 210 с.
2. Закономерности гидрологических процессов. / Под ред. Н.И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2012. – 733 с.
3. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. – М.: Наука, 1981. – 255 с.

References

1. Bolgov M.V., Sarmanov I.O., Sarmanov O.V. Markovskie protsessy v gidrologii. / Pod red. akademika RAN Khublariana M.G. – M.: In-t vodnyh problem RAN, 2009. – 210 s.
2. Zakonomernosti gidrologicheskikh protsessov. / Pod red. N.I. Alekseevskogo. – M.: GEOS, 2012. – 733 s.
3. Kritsky S.N., Menkel M.F. Gidrologicheskie osnovy upravleniya rechnym stokom. – M.: Nauka, 1981. – 255 s.

4. **Раткович Д.Я.** Многолетние колебания речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 255 с.
5. **Рождественский А.В., Чеботарев А.И.** Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
6. **Воропаев Г.В., Исмайлов Г.Х., Федоров В.М.** Проблемы управление водными ресурсами Арало-Каспийского региона. – М.: Наука, 2003. – 427 с.
7. **Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.** Водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 392 с.
8. Современное состояние теория исследования операций. / Под. ред. Н.Н. Моисеева. – М.: Наука, 1979. – 464 с.
9. **Исмайлов Г.Х., Мурашченкова Н.В., Исмайлова И.Г.** Методика оценки сложнотрансформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна // Природообустройство. – 2020. – № 5. – С. 71-77.
10. **Исмайлов Г.Х., Мурашченкова Н.В.** Оценка и прогноз речного стока бассейна р. Волги с учетом возможного изменения климата // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2018. – № 4. – С. 56-61.
11. **Великанов А.Л., Коробова Д.Н., Пойзнер В.И.** Моделирование процессов функционирования ВХС. – М.: Наука, 1983. – 104 с.
12. **Исмайлов Г.Х., Перминов А.В.** Мировой водный баланс и водные ресурсы земли, водный кадастр и мониторинг водных объектов. – М.: Изд-во ФГБОУ ВО МГУП, 2013. – 324 с.
13. **Исмайлов Г.Х., Перминов А.В.** Моделирование режимы работы каскада гидроузлов Верхневолжской водохозяйственной системы // Природообустройство. – 2020. – № 2. – С. 99-104
14. **Исмайлов Г.Х., Ваганов Г.А.** Моделирование режимов работы Камского каскада водохранилищ с использованием модели «IMIT-BALANC» // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 26-33.
15. **Кучмент Л.С. Гельфан, А.Н.** Динамика-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 103 с.
16. **Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я.** Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
17. **Исмайлов Г.Х., Прошляков И.В., Мурашченкова Н.В.** Гидрология в природопользовании. Ч. 3. Инженерная гидрология. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2019. – 251 с.
4. **Ratkovich D.Ya.** Mnogoletnie kolebaniya rechnogo stoka. – L.: Gidrometeoizdat, 1976. – 255 s.
5. **Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I.** Statisticheskie metody v gidrologii. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 424 s.
6. **Voropayev G.V., Ismaiyllov G.Kh., Fedorov V.M.** Problemy upravleniya vodnymi resursami Aralo-Caspijskogo regiona. – M.: Nauka, 2003. – 427 s.
7. **Kritsky S.N., Menkel M.F.** Vodohozyajstvennye raschety. – L.: Gidrometeoizdat, 1952. – 392 s.
8. **Sovremennoe sostoyanie teorii issledovaniya operatsij.** / Pod red. N.N. Moiseeva. – M.: Nauka, 1979. – 464 s.
9. **Ismaiyllov G.Kh., Murashchenkova N.V., Ismaiyllova I.G.** Metodika otsenki slozhnotransformiruemykh elementov vodnogo balansa (summarnogo ispareniiya i vlagozapasov) rechnogo baseina. // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 5. – S. 71-77.
10. **Ismaiyllov G.Kh., Murashchenkova N.V.** Otsenka i prognoz rechnogo stoka basseina r. Volgi s uchetom vozmozhnogo izmeneniya klimata. // Ispolzovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii. – 2018. – № 4. – S. 56-61.
11. **Velikanov A.L., Korobova D.N., Pozizner V.I.** Modelirovanie protsessov funktsionirovaniya VHS. – M.: Nauka, 1983. – 104 s.
12. **Ismaiyllov G.Kh., Perminov A.V.** Mirovoj vodny balans i vodnye resursy zemli, vodny kadastr i monitoring vodnyh objektov. – M.: FGBOU VP MGUP, 2013. – 324 s.
13. **Ismaiyllov G.Kh., Perminov A.V.** Modelirovanie rezhima raboty kaskada gidrouzlov Verhnevolzhskoj vodohozyajstvennoj sistemy // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 2. – S. 99-104.
14. **Ismaiyllov G.Kh., Vaganov G.A.** Modelirovanie rezhimov raboty Kamskogo kaskada vodohranilishch s ispolzovaniem modeli «IMIT-BALANC» // Prirodoobustrojstvo. – 2017. – No. 5. – S. 26-33.
15. **Kuchment L.S. Gelfan, A.N.** Dynamika-stokhasticheskie modeli formirovaniya rechnogo stoka. – M.: Nauka, 1993. – 103 s.
16. **Muzylev S.V., Privalskiy V.E., Ratkovich D.Ya.** Stokhasticheskie modeli v inzhenernoj gidrologii. – M.: Nauka, 1982. – 184 s.
17. **Ismaiyllov G.Kh., Proshlyakov I.V., Murashchenkova N.V.** Gidrologiya v prirodopolzovanii. Ch 3. Inzhenernaya gidrologiya. – M.: Izd-vo RGAU-MSHA, 2019. – 251 s.
18. **Recommendastii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vre-**

18. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 78 с.

19. **Христофоров А.В.** Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд. МГУ, 1994. – 141 с.

20. **Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К.** Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. – М.: Изд-во Физматлит, 2002. – 496 с.

21. **Цветков Е.В., Алябышева Т.М., Парфенов Л.Г.** Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 303 с.

Критерии авторства

Исмайлов Г.Х., Перминов А.В., Исмайлова И.Г. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Исмайлов Г.Х., Перминов А.В., Исмайлова И.Г. 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 15.04.2021 г.

Принята к публикации 22.04.2021 г.

mennyh kolebanij rechnogo stoka. – L.: Hidrometeoizdat. 1984. – 78 s.

19. **Khristoforov A.V.** Teoriya sluchajnyh protsessov v gidrologii. – M.: Izd-vo MGU, 1994. – 141 s.

20. **Krivoshey V.A.** Reka Volga (problemy i resheniya) – M.: OOO «Zhurnal RT», 2015. – 92 s.

21. **Tsvetkov E.V., Alyabysheva T.M., Parfenov L.G.** Optimalnye rezhimy gidroelectrostantsij v energeticheskikh sistemah. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 303 s.

Criteria of authorship

Ismaylov G.Kh., Perminov A.V., Ismaylova I.G. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ismaylov G.Kh., Perminov A.V., Ismaylova I.G. 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 15.04.2021

Accepted for publication 22.04.2021