

10. **Makkaveyev N.I.** Ruslo reki i eroziya v yeye basseyne. M.: 2003, 352 str.

11. **Karaushev A.V.** Rechnaya gidravlika. – Gidrometeorologicheskoye izdatel'stvo. – L.: 1969. – 418 s.

12. **Baryshnikov N.B.** Gidravlicheskiye soprotivleniya rechnykh rusel. – Izd-vo RGGMU. – Sankt-Peterburg, 2003. – 153 s.

13. **Goncharov V.N.** Dinamika ruslovykh potokov. – Gidrometeoizdat L.: 1962. – 374 s.

The material was received at the editorial office
14.04.2020

Information about the author

Zhezmer Valentin Borisovich, candidate of agricultural sciences, leading researcher, head of the laboratory of safety of hydraulic structures of irrigation and drainage complex FGBNU «VNIIGiM named after A.N. Kostyakov»; 127550, Moscow, B. Academicheskaya, 44, korp. 2; e-mail: v1532133@yandex.ru

УДК 502/504:556.5:574.5:502

DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-129-137

В.Н. МАРКИН, Л.Д. РАТКОВИЧ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОПУСКОВ ИСТРИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Проведен анализ влияния сельскохозяйственных угодий и регулирования стока в Истринском водохранилище на количество и качество водных ресурсов реки Истра. Оценка влияния сельскохозяйственного освоения водосбора показывает изменение объемов годового стока реки примерно на 6%. Исследуется отрицательное воздействие регулирования стока на трансформацию гидрографа реки в нижнем бьефе гидроузла, вызывающее многократное превышение экологически допустимых пределов, что сказывается на всем протяжении от гидроузла имени Куйбышева до устья реки Истры. Сделан прогноз изменения объемов вырабатываемой энергии на Истринской ГЭС с учетом экологических требований по сохранению гидрографа стока в нижнем бьефе. Отмечено снижение годовой выработки электроэнергии на 8,5%. Оценка экологического состояния водохранилища и реки Истра сделана на основании сравнения экологического состояния объектов в естественных условиях и фактического уровня трофности при существующей фосфорной нагрузке. Способ оценки экологического состояния водного объекта и влияния на него антропогенной нагрузки заключается в сопоставлении функции распределения показателей состояния среды. Определяется площадь перекрытия функций плотности распределения, дающая оценку вероятности сохранения естественного состояния, которая интерпретируется как степень сохранности экосистемы. Величина степени сохранности позволяет оценить допустимость внешнего антропогенного воздействия и достаточность водоохраных мероприятий. Соотношение показателей качества воды в водохранилище и в реке показывает примерно 40% соответствие, свидетельствуя о формировании специфической водной системы.

Водный объект, влияние водохранилища, влияние сельскохозяйственных земель, сток реки, качество воды, экологическое состояние, функция распределения.

Введение. Истринское водохранилище играет важную роль для Московского мегаполиса, поскольку входит в состав Москворецкой водной системы, которая вместе с Вазузской гидротехнической системой осуществляет компенсированное многолетнее регулирование Москвы-реки по отношению к створу Рублевского гидроузла (рис. 1). Раствующие экологические проблемы, связанные с изменением условий формирования

водного режима реки, процессами на водосборной площади и водопользованием, приводят к необходимости проведения специальных исследований. В связи с этим в работе проведен анализ Истринского водохранилища в части оценки изменения гидрологических условий и экологического состояния водохранилища.

Наличие малой ГЭС мощностью 3,06 МВт в составе гидроузла и обеспечение требований

судоходства диктует формирование попусков из водохранилища, режим которых не соответствуют внутрисезонным экологическим требованиям. В многоводные периоды года сток реки становится меньше экологически допустимых объемов (что диктуется и требованиями противопоаводковой защиты), а в маловодные – больше. Второе следствие считается нормальным, однако для сформировавшейся экосистемы в целом, избыток воды может быть не благоприятен, как и его дефицит.



Рис. 1. Схема водохранилищ Москворецкой и Вазузской гидротехнических систем

Подтверждением сказанному является целый ряд законов экологии [1], в частности закон «оптимальности»: с наибольшей эффективностью любая система функционирует в некоторых пространственно-временных пределах. Параметры любой системы влияют на ее жизнедеятельность, например, сокращение объемов стока снижает транспортирующую способность водотока, жизненное пространство гидробионтов, скорость обмена веществом, энергией и информацией, другие функции.

Следуя логике вышесказанного, попуски из водохранилища, осуществляемые в нижний бьеф, должны соответствовать экологическим требованиям – сохранению

экосистемы и ее природных функций. Истринское водохранилище представляет собой искусственный водоем, аналог природных озер. Поэтому водный режим водохранилищ должен обеспечивать условия, схожие с озерными экосистемами [2, 3].

Изменить существующий режим работы водохранилища сложно, так как он привязан к режиму водопотребления, однако эколого-водохозяйственный анализ функционирования системы необходим для накопления опыта управления водными ресурсами и корректировки работы водохранилищ с максимальным соблюдением экологических требований.

Цель и задачи исследований. Целью предпринятых исследований является анализ влияния сельскохозяйственных угодий на гидрологические показатели водотока, включая количественные изменения параметров стока и водного режима, выраженные как в переформировании гидрографа стока в нижнем бьефе гидроузла, так и в многолетней изменчивости. При этом соблюдение экологических нормативов по сохранению естественного гидрографа стока вызывает потерю объемов гарантированной водоотдачи объекта, в том числе выработки электроэнергии и мощности гидроэлектростанции. Таким образом, задачи исследований связаны с одной стороны с оценкой изменения природных компонентов, с другой – с показателями эффективности водохозяйственной системы.

Объекты и методы исследований. Истринское водохранилище многоцелевое, предназначено для коммунального водоснабжения, борьбы с наводнениями, санитарного обводнения, водного транспорта, энергетики, рекреационных и рыбохозяйственных целей. Гидроузел контролирует 49% площади водосбора (табл. 1).

Таблица 1

Гидрологические показатели Истринского водохранилища

Длина, км	Средняя ширина, км	Средняя глубина, м	Модуль стока, л/с×км ²	Норма притока ¹ , млн м ³	Площадь (НПУ), км ²	Полный объем, км ³	Площадь водосбора, км ²
25	1,5	5,4	6	191	33,6	0,183	1010

В настоящее время вода в Истринском водохранилище оценивается по классификатору качества как «грязная». Основными загрязнителями являются тяжелые металлы (*Fe*, *Mn*) и нефтепродукты с концентрацией,

превышающей рыбохозяйственные нормативы от 2 до 18 ПДК.

Ниже гидроузла, в районе с. Павловская слобода, отмечается затопление земель с вероятностью 86%, при расходах

¹ В створе Куйбышевского гидроузла.

$3160 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 2) (среднегодовое максимальное значение расхода половодья $276 \text{ м}^3/\text{с}$, норма годового стока $11,7 \text{ м}^3/\text{с}$). Уровень воды во время половодья повышается на $2,7 \text{ м}$. Отмеченное выше влияние озерности и заболоченности в совокупности снижает максимальный расход половодья в соответствии с формулами В.Е. Водогрецкого (Водогрецкий, 1990), соответственно, на 27 и $1,4\%$. При этом вероятность недопустимого затопления земель снизилась до 60% , что можно видеть на рисунке 2.

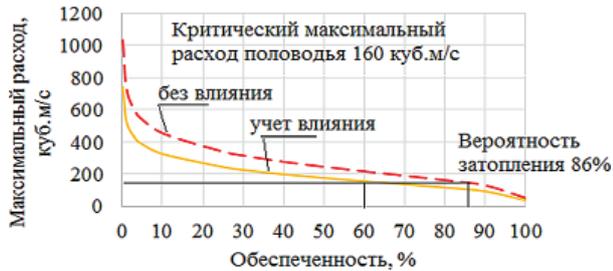


Рис. 2. Кривая обеспеченности максимальных расходов половодья р. Истра в створе с. Павловская слобода

Изменение гидрологических условий реки Истра происходит по причине использования водосборной площади для целей сельского хозяйства и в связи созданием водохранилища, попуски из которого в нижний бьеф подчинены хозяйственным требованиям, что делает их более равномерными внутри года. Сельское хозяйство оказывает на реку косвенное влияние, которое проявляется в изменении условий формирования стока, оценка которого выполняется по разнице суммарного испарения с естественных и сельскохозяйственных угодий [4].

Влияние водохранилища на изменение стока реки в нижнем бьефе оценивалось как степень изменения естественного гидрографа по среднему году, чтобы учесть наиболее характерные условия формирования биотического состава. Расчеты проводились в месячных интервалах времени, принимая во внимание режим проектных попусков из Истринского водохранилища. Степень изменения гидрографа в i -ый интервал времени можно свести к относительным характеристикам с помощью формулы (1):

$$\Delta_i = (\omega_i^{\text{ест}} - \omega_i^{\text{пр}}) \cdot 100 / \omega_i^{\text{ест}}, \quad (1)$$

где $\omega_i^{\text{ест}}$ и $\omega_i^{\text{пр}}$ – соответственно, объем естественного стока реки и попусков за i -ый расчетный интервал времени. В целом за год степень изменения характеризуется коэффициентом вариации относительных отклонений стока Δ_i :

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (\Delta_i - \Delta_{\text{ср}})^2}{11}} \Delta_{\text{ср}} \quad (2)$$

Малые значения коэффициента C_v свидетельствуют о сглаженности гидрографа (характерно для попусков), а большие – о схожести с естественными условиями.

Куйбышевский гидроузел комплексного назначения и энергетика как участник водохозяйственного комплекса имеет подчиненный характер. Однако экономическая оценка ущербов от экологизации попусков, наглядно проявляется на примере ущербов энергетике. Максимальная выработка энергии на ГЭС достигается при относительно постоянном расходе воды и напоре. Исправление гидрографа попусков на соответствующие в большей степени экологическим снижает энергетические показатели. Для оценки потерь гидроэнергетики проведена серия имитационных водно-балансовых расчетов по трем сценариям:

- попуски ГЭС соответствуют современным условиям работы (Базовый вариант);
- попуск, максимально ориентированный на экологические требования (соответствует естественному гидрографу стока);
- промежуточный вариант, когда попуски ГЭС выдерживаются как среднее значение фактического режима регулирования и экологического стока.

Для каждого из вариантов определялись значения годовой выработки энергии, среднесуточной обеспеченной мощности, расчетного напора. В качестве анализируемого критерия использовался коэффициент вариации относительных поинтервальных изменений стока внутри года (C_v) – формула (2).

Влияние сельскохозяйственных угодий и природных ландшафтных компонентов водосбора на сток р. Истра. Влияния ландшафтных компонентов (лесов, болот, озер и сельскохозяйственных угодий) на формирование гидрографа стока рек проявляется в различных бассейнах по-разному. Так, в бассейне реки Истра увеличение лесистости (на 26% за годы после создания водохранилища) и заболоченности водосбора (из-за создания водохранилища), приводит к снижению объемов половодья на 18 и $1,4\%$ соответственно и увеличению объемов стока в меженный период лето-осень-зима на 19 и $0,7\%$ (табл. 2, 3).

Особенность влияния сельскохозяйственного освоения территории связана в большей степени с изменением суммарного испарения, которое с сельскохозяйственных

угодий больше, чем с естественных лесов и лугов (табл. 4). Изменение стока в бассейне реки Истра под влиянием

сельскохозяйственного использования земель в средний по водности год составляет ~25 млн м³ (6%) (рис. 3).

Таблица 2

Изменение сезонного стока под влиянием ландшафтных компонентов на 1% площади компонента

Ландшафтные компоненты	Весна	Лето-осень	Зима	Год
залесенность	0,30	-0,30	-0,02	0,08
озерность	-2,2	1,4	0,66	0,32
заболоченность	-0,37	0,12	0,25	0,03

Таблица 3

Влияние сельскохозяйственного освоения земель на составляющие водного баланса территории [5]

Вид угодий	Размерность	Период времени						Год
		Месяцы						
		5	6	7	8	9	10	
Осадки	мм	50	66	79	72	57	50	374
Суммарное испарение								
Смешанный лес	мм	26	22	23	8	19	8	106
Пашня	мм	70	88	78	69	32	16	353
Луг	мм	72	71	58	54	27	14	296
Осадки минус суммарное испарение								
Смешанный лес	мм	24	44	56	64	38	42	268
Пашня	мм	-20	-22	1	3	25	34	21
Луг	мм	-22	-5	21	18	30	36	78
Осадки минус суммарное испарение с поверхности водосбора								
Сток (учет с.-х. земель)	млн м ³	15	43	75	85	65	76	359
Сток (безучет с.-х. земель)	млн м ³	14	51	84	91	68	77	384
Влияние с.-х. земель	%	-6	14	10	7	3	1	6

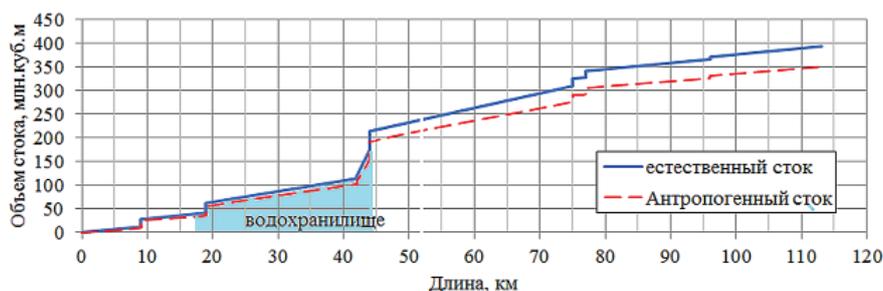


Рис. 3. Влияние сельскохозяйственных угодий на изменение нормы стока по длине реки Истра

Влияние водохранилища на перестроение гидрографа стока реки р. Истра ниже створа гидроузла. Попуски из Истринского водохранилища носят комплексный характер и обеспечивают потребности в воде Московского мегаполиса, гидроэнергетики и водного транспорта. Это сильно изменяет естественный гидрограф стока в нижнем бьефе и ухудшает экологическое состояние реки. Происходит существенное увеличение объемов воды в реке в месяцы межени (VI...III) и снижение их (истощение

реки) в половодье (IV...V). Естественные расходы в створе гидроузла сокращаются в четыре раза в меженный период (рис. 4). По мере удаления от гидроузла, за счет боковой приточности протекают процессы восстановления естественного режима стока реки, однако их эффективность невысока.

Негативная трансформация гидрографа, многократно превышающая экологически допустимые пределы ($\pm 30\%$), сказывается на всем протяжении от гидроузла им. Куйбышева до устья р. Истры. При этом

энергетическим попускам соответствует степень сглаженности $C_{v, \text{поп}} = 0,28$, а экологическому гидрографу $C_{v, \text{поп}} = 1,7$.

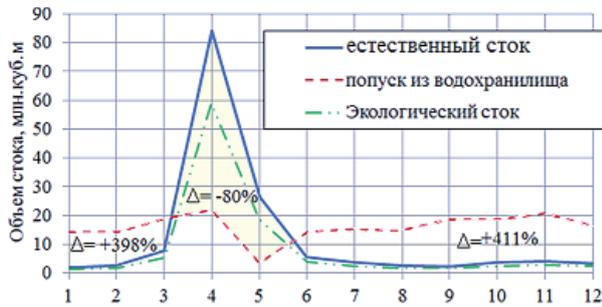


Рис. 4. Изменение объема попусков из водохранилища, естественного и экологического стока реки в створе с Павловское

Соблюдение экологических требований по сохранению гидрографа стока в нижнем бьефе ведет к снижению годовой выработки электроэнергии на 12%. Среднесуточная обеспеченная мощность снижается в 3 раза (рис. 5).

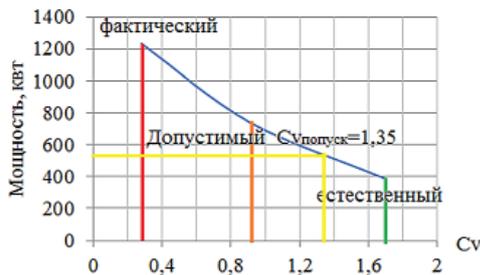


Рис. 5. Изменение среднесуточной обеспеченной мощности ГЭС в зависимости от режима энергетических попусков

Формирование попусков с учетом экологически допустимого переформирования гидрографа стока в пределах $\pm 30\%$ (+ в меженные периоды и – в половодье), соответствует $C_{v, \text{попуск}} = 1,35$, повлечет снижение годовой выработки электроэнергии на 8,5%, и среднесуточной обеспеченной мощности в 2,3 раза.

Оценка экологического состояния водохранилища. Исследования проводилась ООО «ВЕД» [6] с участием одного из авторов статьи в гидрохимических и гидробиологических исследованиях рассматриваемого объекта. Это позволило определить нормативы допустимого воздействия на водохранилище, связанного со сбросом загрязняющих веществ, провести зонирование площади водохранилища по формированию

качества воды, степени сапробности и трофности. Предполагается развитие исследований в направлении анализа режимов работы водохранилища.

Оценка экологического состояния водохранилища и реки Истра сделана на основе сравнения экологического состояния естественного фона и допустимого фона (естественного с учетом незначительной загрязненности). Также анализировался фактический уровень трофности при существующей фосфорной нагрузке.

Способ оценки экологического состояния водного объекта и влияния на него антропогенной деятельности [7] заключается в сопоставлении функции распределения показателя состояния среды для природных (естественных) условий $f_{\text{ест}}(x)$ $x \in [x_0 \dots x_2]$ и условий, учитывающих антропогенное воздействие $f_{\text{ант}}(x)$. Пересечение функций в точке с абсциссой $x = x_1$.

$$\Delta P = \int_{x_0}^{x_1} f_{\text{ест}}(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} f_{\text{ант}}(x) dx \quad (3)$$

Площадь перекрытия функций плотности распределения представляет собой вероятность сохранения естественного состояния и интерпретируется как степень сохранности экосистемы. Величина степени сохранности позволяет оценить состояние водного объекта, а значит, допустимость внешнего антропогенного воздействия и достаточность водоохранных мероприятий.

Для оценки состояния (или уровня трофности) для оценки состояния можно использовать комплексные показатели качества воды, например, коэффициент предельной загрязненности ($K_{\text{пз}}$), характеризующий осредненную кратность превышения нормативов качества. Обосновано это тем, что комплексные показатели отражают состояние среды обитания водных организмов, а значит, влияют на экологическое состояние водного объекта.

Уровень трофности и допустимая биогенная (фосфорная) нагрузка на водохранилище оценена с помощью зависимости Фолленвайдера [8]:

$$L = p \cdot h_{\text{cp}} \cdot \left(\sigma + \frac{1}{\tau} \right), \quad (4)$$

где L – фосфорная нагрузка на единицу площади водного объекта, г/м²; p – концентрация фосфора в воде, г/м³; h_{cp} – средняя глубина водоема, м; σ – коэффициент седиментации (удержания) веществ в водоеме,

за счет поглощения их донным грунтом, растениями, 1/год. Коэффициент рассчитан по формуле:

$$\sigma = (C_{\text{во}} - C_{\text{в}}) / C_{\text{во}} \quad (5)$$

$C_{\text{во}}$ – концентрация фосфора в водохранилище без учета ассимилирующей способности, мг/л:

$$C_{\text{во}} = G / V_{\text{ср}} \quad (6),$$

где G – объем общего фосфора, поступающего в водохранилище с водосбора, мг/л; $V_{\text{ср}}$ – средний объем воды в водохранилище, млн м³; $C_{\text{во}}$ – фактическая концентрация фосфора в нижнем бьефе водохранилища, мг/л; t – время полного водообмена в водохранилище, год.

Результаты исследований качества водных ресурсов. Естественный фон по результатам исследований оценивается на уровне «умеренно-загрязненного» класса качества воды, которому допустимый фон соответствует только на 17% (водохранилище) и 12% (река) (табл. 6).

С вероятностью около 77% допустимый фон водохранилища соответствует классу качества воды «загрязненная» (рис. 6, табл. 4). Для рек с примерно равной вероятностью это соответствует классам «загрязненный»-«очень грязный» класс.

Таблица 4

Вероятность соответствия естественного фона водных объектов классам качества воды

Водный объект	Класс качества			
	Умеренно загрязненный	Загрязненный	Грязный	Очень грязный
Озеро	0,17	0,77	0,06	0,00
Река	0,12	0,30	0,30	0,28

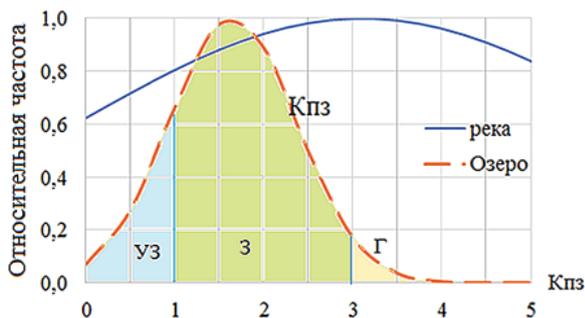


Рис. 6. Кривые плотности распределения комплексного показателя качества воды ($K_{\text{пз}}$) для естественных водотоков и водоемов Москворецкой системы
Класс качества:

- УЗ – умеренно загрязненный ($K_{\text{пз}} = 0...1$),
- З – загрязненный ($K_{\text{пз}} = 1...3$),
- Г – грязный ($K_{\text{пз}} = 3...5$)

Формирование водохранилища как озерной системы ведет к ухудшению качества фона. Степень соответствия качества воды в водохранилище только на 42% соответствует реке, что указывает на то, что формируется не столько озерная, сколько специфическая антропогенная система. Среднегодовая концентрация общего фосфора в водохранилище достигает 0,38 мг/л (табл. 5), что соответствует эвтрофной стадии развития водного объекта.

Допустимая по условию эвтрофирования нагрузка оценивается в 0,11 г/м² в соответствии с формулой:

$$L_{\text{доп}} = 0,015 \cdot h_c \cdot (1 + \sqrt{\tau}) / \tau \quad (7)$$

где h_c – средняя глубина водохранилища, м; 0,015 – допустимая концентрация общего фосфора, соответствующая мезотрофному уровню развития водного объекта, мг/л.

Таблица 5

Параметры формулы Фолленвайдера (средняя площадь водохранилища 22 км²)

2,17	0,47	0,34	47,7	133	0,18	1,43	0,38
------	------	------	------	-----	------	------	------

Концентрация фосфора превышает допустимую по условию эвтрофирования, что говорит о необходимости водоохраных мероприятий (ВОМ) с эффективностью $\Theta_{\text{ВОМ}} = 96\%$. Наибольший объем фосфора поступает в водохранилище от диффузных источников, в основном с сельскохозяйственных угодий. Их вклад в загрязнение водохранилища по результатам

исследований доходит до 97% [6]. В числе водоохраных мероприятий следует предусмотреть:

- лесополосы шириной не менее 10 м с расстоянием между ними 150...300 м (эффективность воздействия $\Theta_{\text{л}} = 20...40\%$);
- береговые биоплато по фронту поступления диффузных стоков в водохранилище ($\Theta_{\text{пл}} = 40...60\%$);

- обвалование сельскохозяйственных полей водозадерживающими валами, высотой 25...30 см ($\Theta_{обв} = 20...40\%$);

- зяблевая вспашка поперек склона ($\Theta_{расп} = 40...70\%$).

Общая эффективность мероприятий на водосборе достаточно высока, поскольку оценивается в диапазоне 75-95%.

Рассмотрим изменение биогенной нагрузки (по фосфору) на водохранилище при уменьшении диапазона изменения уровня воды в водохранилище и поддержание уровня верхнего бьефа (УВБ) на высоких отметках. Оптимальная сработка УВБ по условию выработки электроэнергии на ГЭС должна быть в пределах 5...25% от напора (при существующем режиме напор равен 18,5 м), что соответствует ~1...4,6 м. Оптимальной сработке УВБ соответствует средняя глубина водохранилища 4,7...5 м. Соответственно фосфорная нагрузка снижается на 8% по сравнению с существующей и станет равной 2,1 г/м² (рис. 7), что практически не снижает среднегодовую концентрацию фосфора.



Рис. 7. Зависимость средней глубины водохранилища ($H_{ср}$), фосфорной нагрузки (L) и концентрации фосфора (P) от площади водной поверхности водохранилища

Обсуждение. Большинство речных бассейнов во всех странах находятся в состоянии, отличающемся от естественного вследствие влияния хозяйственной деятельности, которая проявляется в изъятии речного стока, изменении его водного режима посредством сезонного и многолетнего регулирования, отрицательной (как правило) экологической динамикой. На наш взгляд, представляют научный и практический интерес подходы и методика экспертной оценки влияющих факторов на экологическое состояние водного объекта в сочетании с водохозяйственным анализом эффективности

природно-технических систем. Особенно важно выработать общие подходы применительно к водным объектам в составе сложных водохозяйственных систем, таких как Московецкая водная система. Названные подходы прежде всего касаются комплексных водохозяйственных и водоохраных мероприятий, обеспечивающих рациональное водопользование. Эти мероприятия должны компенсировать антропогенное давление, оказываемое как непосредственно на водоток, так и на всю водосборную площадь. Анализирующие зависимости, приведенные на рисунках данной статьи, дают возможность внести необходимые коррективы в режим регулирования стока и в природоохранные меры. Мы полагаем, что дальнейшие исследования будут направлены на создание имитационных моделей, параллельно учитывающих экологические и водохозяйственные показатели, вероятные климатические и антропогенные факторы.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Совокупное влияние сельскохозяйственной деятельности приводит к снижению нормы речного стока примерно на 6%. Сокращение нормы стока обычно сопровождается увеличением коэффициента вариации годового стока, поэтому вероятным является снижение суммарной гарантированной отдачи водохранилища.

2. В нижнем бьефе водохранилища происходит экологически недопустимое переформирование стока, более чем в три раза по сравнению с естественным фоном. Эффект перераспределения сказывается практически до устья, несколько снижаясь за счет слабо-искаженной боковой приточности. Допустимое переформирование гидрографа стока в нижнем бьефе по нашим оценкам составляет 21%.

3. Соблюдение экологических нормативов по сохранению естественного гидрографа стока связано с потерей объемов годовой вырабатываемой энергии на 8,5...12%. Ориентация на экологические приоритеты приводит к снижению среднесуточной обеспеченной мощности в 2-3 раза.

4. Качество воды Истринского водохранилища на 42% соответствует качеству воды в реке Истра. Трофический статус водохранилища соответствует эвтрофному уровню. Такое положение требует проведения

водоохранных мероприятий с эффективностью 96%, что снизит поступление фосфора от диффузных источников.

5. Все изменения, происходящие в изучаемом объекте, сказываются и на работе Москворецкой водной системы в целом.

Библиографический список

1. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.

2. Horne A.J., Goldman C.R. LAKE ECOLOGY OVERVIEW. Chapter 1, 1994. Limnology. 2nd edition. McGraw-Hill Co., New York, USA.

3. Robert G. Wetzel. Limnology. Lake and river ecosystems. Third edition. New York: academic press. Animprintedofelsevier, 2001. – p. 1006.

4. Малые реки России / Под ред. Черняева А.М. – Свердловск: Среднеуральское книжное изд-во, 1988. – С. 316.

5. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы). Национальное информационное агентство «Природные ресурсы». Издательско-полиграфический комплекс НИИ–Природа. 2019. <http://voda.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=548510>.

6. Пояснительная записка к сводному тому проекта нормативов допустимого

воздействия по бассейну Истринского водохранилища. Государственный контракт № 32 от 08 декабря 2008 г. – [Электронный ресурс]. – Экологическая и водохозяйственная фирма ООО «ВЕД». – [режим доступа]: <http://gidro-ved.ru/ru/articles>.

7. Шабанов В.В., Маркин В.Н. Методика эколога – водохозяйственной оценки водных объектов: монография. – М.: РГАУ-МСХА, 2014. – 162 с.

8. Vollenweider R.A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors of eutrophication. OECD, Paris, 1971. – p. 159.

Материал поступил в редакцию 03.07.2020 г.

Сведения об авторах

Маркин Вячеслав Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19; e-mail: mvnarkin@mail.ru

Раткович Лев Данилович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550 г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19; e-mail: levkivr@mail.ru

V.N. MARKIN, L.D. RATKOVICH

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

OPTIMIZATION OF THE ECOLOGICAL DESCHARGE REGIME OF THE ISTRA RESERVOIR

The comprehensive analysis of agricultural land and flow regulation in the Istra reservoir on the quantity and quality of water resources of the Istra river was carried out. The assessment of the impact of agricultural development of water collection shows a change in the annual river flow by about 6%. We study the negative impact of flow regulation on the transformation of the river hydrograph in the downstream of the hydroelectric dam, which causes multiple exceedances of environmental limits, which affects the entire length from the Kuibyshev hydroelectric facility to the mouth of the Istra river. The forecast of changes in the volume of energy produced at the Istrinsky HPP is made, considering the environmental requirements for preserving the flow hydrograph in the lower stream. There was a decrease in annual electricity generation by 8.5%. The assessment of the ecological state of the water reservoir and the Istra river was made based on a comparison of the ecological state of objects under natural conditions and existing phosphorus load. The method of assessing the ecological state of a water body and the impact of anthropogenic load on it is based on comparing the distribution function of environmental indicators. The area of overlap of distribution density functions is determined to estimate the probability of preserving the natural state. This probability is interpreted as the degree of preservation of the ecosystem. The degree of preservation allows us to assess the state of the water body, admissibility of external anthropogenic impact and sufficiency of water protection measures. The ratio of water quality

indicators in the reservoir and in the river shows approximately 40% of compliance indicating the formation of a specific water system.

Water body, reservoir impact, agricultural land impact, river flow, water quality, ecological state, distribution function.

References

1. **Rejmers N.F.** Prirodopolzovanie, Slovar-spravochnik. – M.: «Mys», 1990. – 639 s.
2. **Horne A.J., Goldman C.R.** LAKE ECOLOGY OVERVIEW. Chapter 1, 1994. Limnology. 2nd edition. McGraw-Hill Co., New York, USA.
3. **Robert G. Wetzel.** Limnology. Lake and river ecosystems. Third edition. New York: academic press. An imprinted of elsevier, 2001. – p. 1006.
4. **Malyerek i Rossii** /Pod red. CHernyaeva A.M. – Sverdlovsk: Sredneural'skoeknizhnoeizdatel'stvo, 1988. – S. 316.
5. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnyh resursov Rossijskoj Federatsii v 2018 godu». Federalnoe agentstvo vodnyh resursov (Rosvodresursy). Naciona-noe informacionnoe agentstvo «Prirodnye resursy». Izdatelsko-poligraficheskij kompleks NIA–Priroda. <http://voda.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=548510>.
6. Poyasnitelnaya zapiska k svodnomu tomu proekta normativov dopustimogo vozdeystviya po bassejnu Istrinskogo vodohranilishcha. Gosudarstvennyj kontrakt № 32 ot 08 dekabrya 2008 g. – [Elektronnyj resurs]. – Ekologicheskaya i vodohozyajstvennaya firma OOO «VED». – [rezhim dostupa]:

<http://gidro-ved.ru/ru/articles> (po dannym na 25.03.2013).

7. **Shabanov V.V.** Metodika ekologo–vodohozyajstvennoj otsenki vodnyh objektov: monografiya/ V.V. Shabanov, V.N. Markin. – M.: RGAU-MSHA, 2014. – 162 s.

8. **Vollenweider R.A.** Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors of eutrophication. OECD, Paris, 1971. – p. 159.

The material was received at the editorial office
03.07.2020

Information about the authors

Markin Vyacheslav Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of complex use of water resources and hydraulics, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; mvnarkin@mail.ru

Ratkovih Lev Danilovich, candidate of technical sciences, professor, professor of the department of complex use of water resources and hydraulics, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; e-mail: levkivr@mail.ru

УДК 502/504:532.5

DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-137-144

Е.Е. ВОЛКОВА, Д.Ю. МАРТЫНОВ, М.В. БАРСУКОВА, Т.С. КОРОЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВАКУУМ-КОМПРЕССОРА ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ

В статье рассматривается система, содержащая резервуар, открытый сверху, напорный насос и вакуумную камеру, расположенные на разной высоте относительно основания резервуара. Резервуар, насос и вакуумная камера соединяются между собой, образуя единую автоматизированную систему в виде гидравлического вакуум-компрессора объемного действия. На основе уравнения Бернулли было получено параметрическое решение в виде выражения для средней скорости течения жидкости в поперечном сечении трубы, связывающей резервуар и вакуумную камеру $v_{mp}(t) = \beta_1 \cdot t + \beta_2$, которое является универсальным и может быть использовано для определения базовых параметров гидравлических режимов перемещения жидкости внутри данной системы. В частности,