

Г.Х. ИСМАЙЛОВ, А.В. ПЕРМИНОВ

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ КАСКАДА ГИДРОУЗЛОВ ВЕРХНЕВОЛЖСКОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ**

*В статье на примере Верхневолжской водохозяйственной системы (ВХС) проводится анализ и дается оценка функционирования этой системы в изменяющихся природных и хозяйственных условиях. Выявлены основные особенности управления водными ресурсами в современных условиях. Для решения задачи поиска оптимальных режимов работы Верхневолжского каскада гидроузлов разработан специальный алгоритм (модельный комплекс), работающий в имитационном режиме и использующий принципы многокритериальной оптимизации справедливых уступок. Объектом исследования является Верхневолжская ВХС. Функционирование системы описано уравнениями на каждом расчетном отрезке времени. Результаты имитационного эксперимента показывают, что используемая модель «IMIT-BALANS» позволяет реализовать режимы работы Верхневолжского каскада гидроузлов как в маловодные годы, так и в годы средней и высокой водности.*

*Гидроузел, водохранилище, каскад водохранилищ, водность сезона, режим наполнения, холостой сброс, навигационный уровень, уровень сработки водохранилища.*

**Введение.** Анализ использования водных ресурсов Верхневолжской ВХС выявил особенности управления водными ресурсами:

- дефицит водных ресурсов в отдельные промежутки времени, а также ухудшение их качества ведут к обострению водохозяйственных проблем;

- значительный ущерб, наносимый окружающей природной среде, при возрастании антропогенного воздействия на водные ресурсы в зоне формирования, транспортировки и использования стока, что противоречит условиям функционирования водохозяйственные системы (ВХС), включающих себя каскад водохранилищ.

Исходя из перечисленного, возникает необходимость усовершенствования методики анализа и оценки эффективности управления водными ресурсами рассматриваемого речного бассейна. В ходе применения модельного комплекса «IMIT-BALANS» выполнен анализ режима работы Верхневолжского каскада водохранилищ и оценена эффективность работы этой водохозяйственной системы. [1, 2, 3, 4].

**Объектом исследования** является Верхневолжский ВХС, являющимся одной из ступени Волжско-Камского каскада, состоящий из следующих гидроузлов – Ивановский, Угличский, Рыбинский, Горьковский (Нижегородский), Чебоксарский. Взаимное расположение гидроузлов показано на рисунке 1. Основные характеристики

Верхневолжских водохранилищ приведены в таблице 1.



**Рис. 1. Верхневолжская водохозяйственная система**

**Иваньковское водохранилище.** Площадь водосбора 40,57 тыс. км<sup>2</sup>, среднемноголетний сток 9,63 км<sup>3</sup> в год, сток весеннего половодья 4,71 (49%) км<sup>3</sup>. Отметка минимального навигационного уровня водохранилища равна 121,7 м, отметка ФПУ 124,2 м. Отметка сработки водохранилища в период навигации допустима до 121,7 м. Отметка предполоводной сработки водохранилища выполняется до 118,0 м, при наступлении маловодного половодья – до 120-121 м.

**Угличское водохранилище.** «Площадь водосбора составляет 60,04 тыс. км<sup>2</sup>, среднемноголетний сток 13,59 км<sup>3</sup> в год, сток весеннего половодья 6,2 км<sup>3</sup>. Отметка уровня навигационной сработки водохранилища равна 111,0 м, фактически же водохранилище срабатывается до отметки 110,5-110,6 м, а в маловодные годы до отметки 112,0 м.»

Основные характеристики Верхневолжских водохранилищ

Водохранилище	Годы заполнения	Объём, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала при НПУ, км <sup>2</sup>	Отметка уровня воды при УМО, м	Отметка уровня воды при НПУ, м
		полный	полезный			
Верхневолжское	1845,1944	0,52	0,47	183	203,00	206,50
Иваньковское	1937	1,12	0,81	327	119,50	124,00
Угличское	1939-1943	1,25	0,81	249	107,50	113,00
Рыбинское	1940-1949	25,42	16,67	4550	97,10	102,00
Горьковское	1955-1957	8,82	3,90	1591	82,00	84,00
Чебоксарское*	1981	4,60/12,60	0/5,40	1080/2170	63	63/68**

\*числитель – современный подпорный уровень, знаменатель – проектный уровень. \*\* Проектный уровень.

**Рыбинское водохранилище:** «Подпор водохранилища распространяется от г. Рыбинска по р. Волге до Угличского гидроузла, по р. Шексне – до Череповецкого гидроузла и по р. Мологе – до п. Попчиха. Отметка уровня навигационной сработки водохранилища – 99,5 м. Отметка предполоводной сработки при прогнозе многоводных и средних половодий – 98,0 м, а при прогнозе маловодных половодий – 99,0-100,0 м. Минимальный допустимый уровень в зимний период (УМО) – 97,1 м. Нормальный напор на гидроузле 18,4 м.»

**Горьковское водохранилище.** «Напор на гидроузле при НПУ 15 м. Отметка уровня навигационной сработки 83,6 м. Минимальный допустимый предполоводный уровень 81,0 м. Расчетный минимальный навигационный уровень в нижнем бьефе гидроузла, предусмотренный «Основными правилами» равен 67,25 м, а зимний – 66,30 м. Полезный объём Горьковского водохранилища составляет всего 2,8 км<sup>3</sup>, поэтому возможно осуществлять только недельное и суточное регулирование стока. Нормальный режим попусков воды в нижний бьеф гидроузла при 90% обеспеченности 1100 м<sup>3</sup>/с, гарантированный с обеспеченностью около 100% – 850 м<sup>3</sup>/с. В интересах водного транспорта в начальный период навигации через Горьковский гидроузел могут сбрасываться расходы 1500-2500 м<sup>3</sup>/с.»

**Чебоксарское водохранилище.** «В настоящее время гидроузел эксплуатируется при промежуточной отметке 63,0 м. Отметки уровней на водохранилище в течение навигации стабильные, навигационной сработки не предусматривается. В период весеннего половодья допускается повышение уровня воды у плотины до отметки 63,75 м с последующей сработкой до НПУ. Регулирование Чебоксарского водохранилища суточное и недельное.» [5]

**Методика исследований.** Принимая в расчет многокомпонентность задачи функционирования каскада водохранилищ, для изучения данного процесса наиболее подходящим является метод машинной имитации с использованием блочной структуры. Основное назначение блочной структуры – разукрупнение изучаемого процесса функционирования каскада водохранилищ на ряд составных процессов, в частности, речь идет о формировании критерия эффективности функционирования системы и математических уравнений, определяющих поведение системы при переходе из одного состояния в другое. В конечном итоге получаем структуру элементов рассматриваемой схемы. Фазовые координаты рассматриваемой структуры определяются такими системами уравнениями как: динамики воды в водохранилище в момент времени  $t$  и уравнения кинетики процессов смешения солей в водохранилище в момент времени  $t$ . В качестве такой системы для исследования режима работы Верхневолжской ВХС использован нами модельного комплекса «ИМТ-BALANC» [1, 2, 3, 6].

**Результаты исследований.** Анализ фактических данных показал, что временные ряды климатических и гидрологических характеристик Верхней Волги содержат циклы колебаний, характеризующиеся некоторой повторяемостью, но различающиеся по своим параметрам, что формирует концепцию, включающую в себя антропогенно-обусловленное (нестационарное) изменение речного стока [7, 8, 9].

Результаты исследования показали, что при 5%-м уровне значимости подавляющее число стоковых рядов бассейна Верхней Волги являются стационарными. Нестационарность же выявлена во временных рядах весеннего половодья и летне-осеннего и зимнего межени.

Для оценки результатов имитационной модели послужили следующие критерии:

- отметка предполоводной сработки водохранилища;
- дата начала половодья;
- срок наполнения до отметки НПУ;
- выдерживание отметок минимального навигационного уровня (МНУ):

В статье приведены результаты имитационной модели для лет со средней водностью ( $P = 40-60\%$ ), графики показаны только для части каскада водохранилищ Верхней Волги, а именно Ивановского и Угличского. Модель реализована на примере двухлеток – модельный ансамбль лет водности с заданными параметрами обеспеченности.

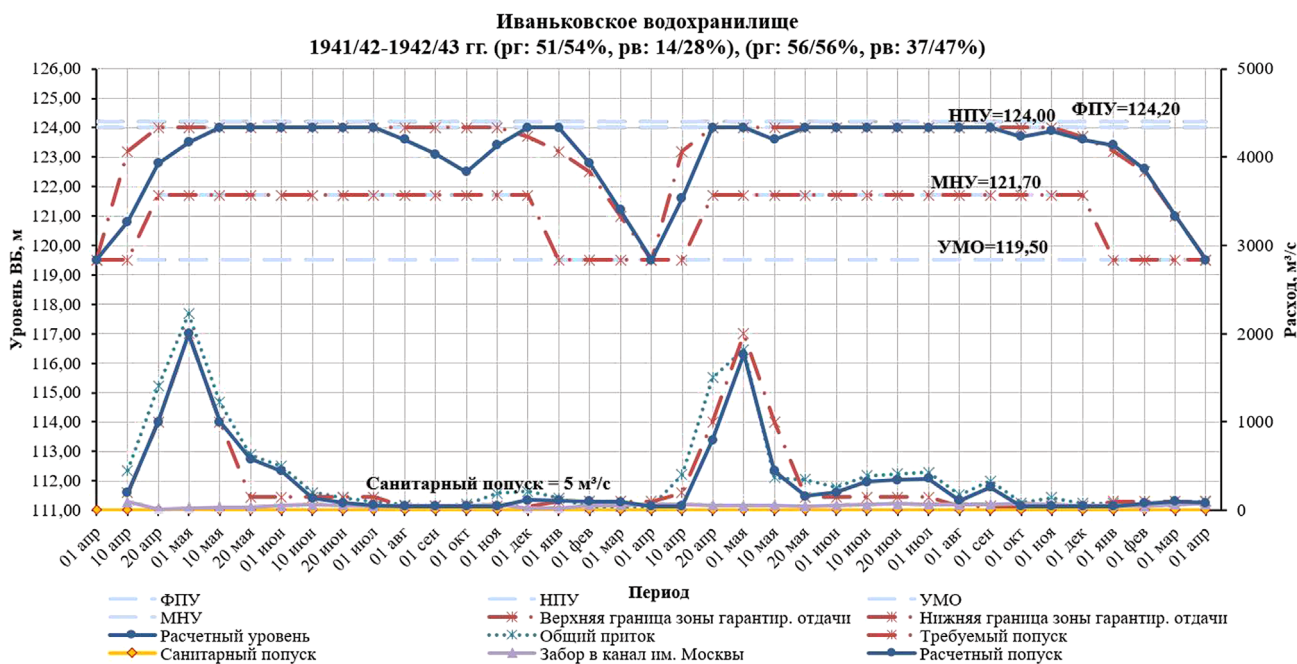


Рис. 2. Результаты имитационного эксперимента в период средней водности Ивановского водохранилища 1941/1942 и 1942/1943 гг. ( $P_{\text{год Волги}} : 51/54\%$   $P_{\text{год Верх. Волги}} : 14/28\%$ )

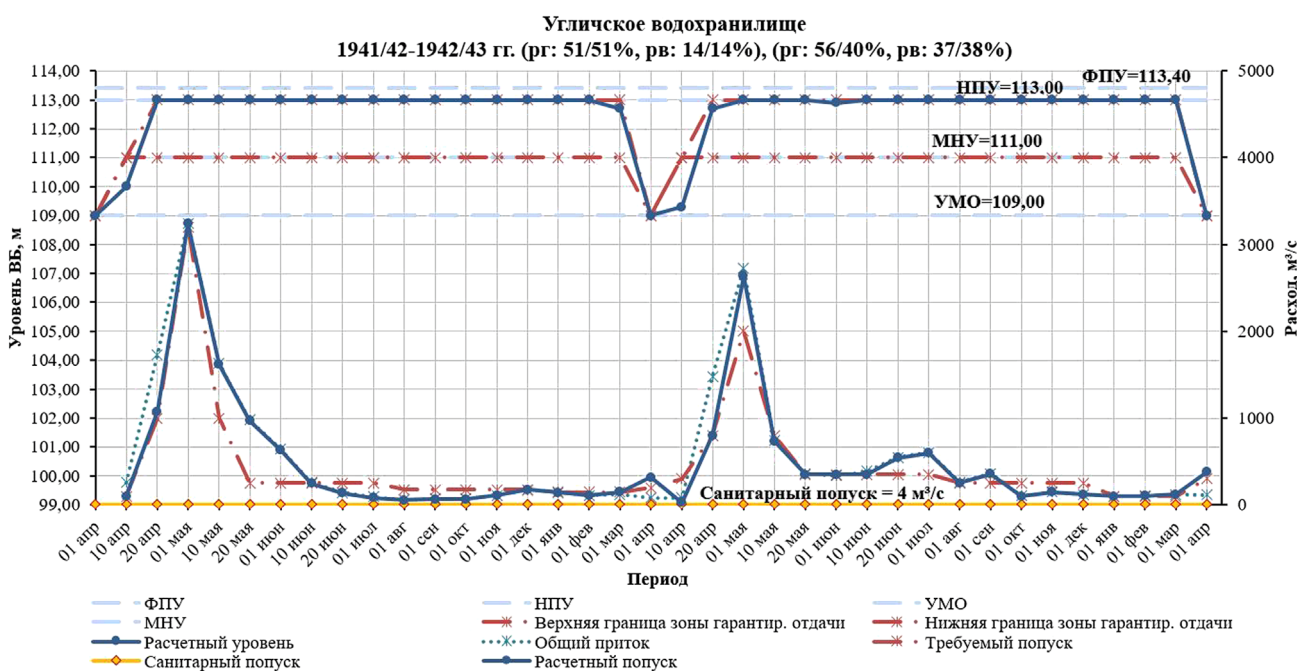


Рис. 3. Результаты имитационного эксперимента в период средней водности Угличского водохранилища 1941/1942 и 1942/1943 гг. ( $P_{\text{год Волги}} : 51/51\%$ ,  $P_{\text{год Верх. Волги}} : 14/14\%$ )

В годы *средней водности*, как видно из рисунка 2, в весенний период наполнение Иваньковского водохранилища начинается со второй декады апреля (от отметки предполоводной сработки 119,5 м) до регламентируемой отметки НПУ (124,0 м) на конец первой декады апреля. Для последующего года начало наполнения несколько позднее – отметка на конец первой декады апреля существенно не отличается от предполоводной, а уровень НПУ устанавливается в первых числах мая. Уровень отметок НПУ (для первого года) поддерживается с первой декады мая до начала июля. Начиная с этого момента водохранилище начинает свою сработку до начала октября, затем подъем уровня воды до отметок НПУ на месячный срок, далее следует понижение уровня вплоть до установления к 1 апреля (начало следующего водохозяйственного года) отметки близкой к 119,5 м в соответствии с обеспеченностью следующего половодья. Самые большие объемы попусков в нижние бьефы осуществляются в период весеннего половодья, максимальный сброс в Угличское водохранилище составил 2040 м<sup>3</sup>/с в год 51%-й обеспеченности, для года 56%-й обеспеченности составил 1710 м<sup>3</sup>/с. В период летне-осенней межени в отдельные годы попуски снижаются до 15 м<sup>3</sup>/с, а затем в зимние месяцы и в период предполоводной сработки увеличиваются до 225 м<sup>3</sup>/с. Минимальный Навигационный уровень выдерживается как для первого, так последующего года ансамбля лет.

На водохранилище Угличского гидроузла рисунок 3 во время половодья отметка НПУ = 113,0 м устанавливается уже ко второй декаде апреля и с небольшими колебаниями поддерживается вплоть до предполоводной сработки. К 1 апреля следующего водохозяйственного года уровень верхнего бьефа достигает отметки УПС (уровень предполоводной сработки) = 109,0 м. Так же, как и на Иваньковском гидроузле, наибольшие среднесуточные расходы подавались в НБ во время половодья, максимальный из них составил для первого года 2900 м<sup>3</sup>/с, максимальный сброс в нижний бьеф для последующего года составляет 2700 м<sup>3</sup>/с, что не превышает суммарную пропускную способность гидротурбин Угличской ГЭС. Характер попусков в период межени можно оценить так: наблюдается снижение попусков до 30 м<sup>3</sup>/с и во время предполоводной сработки емкости водохранилища сбросной расход составляет 300-600 м<sup>3</sup>/с. Отметки

МНУ выдерживаются со второй декады апреля до конца навигационного периода, как для первого, так и последующего года.

Необходимо отметить, что во все периоды водности водопотребление и подача воды в канал им. Москвы обеспечиваются полностью без перебоев.

### Выводы

Результаты численного эксперимента с применением имитационной модели «IMIT-BALANS» показывают, что при определении режимов сработки и наполнения системы водохранилищ Верхневолжской ВХС в годы с пониженным стоком рассматриваемая модель позволяет удовлетворить требования основных водопользователей бассейна реки с учетом особенностей формирования водных ресурсов в данном районе. Результаты имитационного эксперимента для двух и трехлетки дали удовлетворительный результат, что позволяет обеспечить достоверной информацией лиц, принимающих решения при назначении режимов функционирования Верхневолжского каскада водохранилищ.

### Библиографический список

1. **Перминов А.В.** Имитационно-балансовая модель функционирования системы водохранилищ многоцелевого назначения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: 2000. – 189 с.
2. **Исмаилов Г.Х., Перминов А.В., Смирнова М.А.** Применение модели «IMIT-BALANS» для определения режимов работы верхневолжского каскада водохранилищ // Природообустройство. – 2019. – № 3. – С. 83-88.
3. **Смирнова М.А., Перминов А.В.** Имитационное моделирование системы водохранилищ на примере Верхней Волги / Проблемы управления водными и земельными ресурсами. Мат-лы междунар. научного форума. В 3-х ч. Ч. 1. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 482 с.
4. **Смирнова М.А.** Оценка изменения гидрологических характеристик бассейна Верхней Волги при современном климате. Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем / Мат-лы междунар. научно-практ. конф. ч. V. Мониторинг водных объектов. – М.: МГУП, 2013. – С. 218-225.
5. Водохранилища Верхней Волги. Верхне-Волжское бассейновое водное управление

Федерального агентства водных ресурсов – Н-Новгород: 2008, 156 с.

6. **Исмайылов Г.Х., Перминов А.В.** Имитационная модель функционирования систем водохранилищ многоцелевого назначения на примере Волжско-Камского каскада / Мат-лы междунац. юбилейной научно-практ. конф. Проблемы развития сельскохозяйственных мелиораций и водохозяйственного комплекса на базе цифровых технологий. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2019. – С. 88-94.

7. **Исмайылов Г.Х., Ваганов Г.А.** Моделирование режимов работы камского каскада водохранилищ с использованием модели «Imit-Balans» // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 26-34.

8. **Исмайылов Г.Х., Мураценкова Н.В.** Оценка речного стока в бассейне реки Волги // Природообустройство. – 2014. – № 2. – С. 65-69.

9. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов. – М.: МПР РФ, 2007. – 40 с.

Материал поступил в редакцию 21.02.2020 г.

#### Сведения об авторах

**Исмайылов Габил Худуш оглы**, доктор технических наук, профессор кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19; e-mail: gabil-1937@mail.ru

**Перминов Алексей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19; e-mail: alexperminov@gmail.com

**G.KH. ISMAIYLOV, A.V. PERMINOV**

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

## MODELING OF THE OPERATING MODE OF THE HYDRAULIC UNITS CASCADE OF THE UPPER VOLGA MANAGEMENT SYSTEM

*Using the example of the Upper Volga water management system (WMS), the article analyzes and assesses the functioning of this system under the changing natural and economic conditions. The main features of water resources management under the modern conditions are revealed. To solve the problem of searching for optimal operating regimes of the Verkhnevolzhsky cascade of waterworks, a special algorithm (model complex) has been developed that works in a simulation mode and uses the principles of multi-criteria optimization of fair concessions. The object of study is the Verkhnevolzhsky WMS. The functioning of the system is described by equations on each calculated time interval. The results of the simulation experiment show that the IMIT-BALANS model used allows us to implement the operating modes of the Verne-Volga cascades of hydroelectric facilities both in dry years and in medium and high water years.*

*Hydraulic unit, water reserve, cascade of water reserves, seasonal water content, filling mode, idle water discharge, navigation level, reservoir drawdown level.*

#### References

1. **Perminov A.V.** Imitatsionno-balansovaya model funktsionirovaniya sistemy vodohranilishch mnogotselovogo naznacheniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnikeskikh nauk. – М.: 2000. – С. 189.

2. **Ismaiyllov G.Kh., Perminov A.V., Smirnova M.A.** Primenenie modeli «IMIT-BALANS» dlya opredeleniya rezhimov raboty Verkhnevolzhskogo kaskada vodohranilishch // Prirodobustroystvo. – 2019. – № 3. – С. 83-88.

3. **Smirnova M.A., Perminov A.V.** Imitatsionnoe modelirovanie sistemy vodohranilishch

na primere Verhnej Volgi. / Problemy upravleniya vodnym i zemelnymi resursami. Mat-ly mezhdun. nauchnogo foruma. Ch. 1. – М.: Izd-vo RGAU-MSHA, 2015. – 482 s.

4. **Smirnova M.A.** Otsenka izmeneniya gidrologicheskikh harakteristik bassina Verhnej Volgi pri sovremennom climate. Problemy kompleksnogo obustrojstva tehnoprirodnih system / Mat-ly mezhdun. nauchno-prakt. konf. ch. V. Monitoring vodnyh objektov. – М.: MGUP, 2013. – С. 218-225.

5. Vodohranilishcha Verhnej Volgi. Verhne-Volzhscoe bassejnovoe vodnoe upravlenie

Federalnogo agentstva vodnyh resursov. – N-Novgorod: 2008, 156 s.

6. **Ismailyov G.Kh., Perminov A. V** Imitatsionnaya model funktsionirovaniya sistem vodohranilishch mnogotselevogo naznacheniya na primere Volzhsko-Kamskogo kaskada / Mat-ly mezhdun. yubilejnoj nauchno-prakt. konf. Problemy razvitiya selskohozyajstvennyh meliortatsij i vodohozyajstvennogo kompleksa na baze tsifrovyyh tehnologij. M.: Izd-vo RGAU-MSHA, 2019. – S. 88-94.

7. **Ismailyov G.Kh., Vaganov G.A.** Modelirovanie rezhimov raboty kamskogo kaskada vodohranilishch s ispolzovaniem modeli «Imit-Balans» // Prirodoobustrojstvo. – 2017. – № 5. – S. 26-34.

8. **Ismailyov G.Kh., Murashchenko N.V.** Otsenka rechnogo stoka v bassejne reki Volgi // Prirodoobustrojstvo. – 2014. – № 2. – S. 65-69.

9. Metodika rascheta vodohozyajstvennyh balansov vodnyh objektov. – M.: MPR RF, 2007. – 40 s.

The material was received at the editorial office  
21.02.2020

#### Information about the authors

**Ismailyov Gabil Khudush ogly**, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; e-mail: gabil-1937@mail.ru

**Perminov Alexej Vasiljevich**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow ul. Pryanishnikova, d. 19; e-mail: alexperminov@gmail.com

УДК 502/504:627.157

DOI 10.26897/1997-6011/2020-2-104-111

**Г.Ю. ТОЛКАЧЕВ<sup>1</sup>, Б.И. КОРЖЕНЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Е.Н. САМАРИН<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

## ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКИХ ПРОИЗВОДСТВ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ РЕК В БАССЕЙНЕ р. КЛЯЗЬМА

*В настоящее время состояние водных объектов определяется техногенными факторами. С точки зрения техногенной нагрузки наиболее опасными загрязняющими веществами являются микроэлементы Hg, Cd, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn, As. При этом исследования донных отложений водоёмов позволяют установить неблагоприятные участки и определить источники загрязнения. В настоящей работе в качестве показателей загрязнения рассматриваются индексы загрязнённости перечисленными микроэлементами донных отложений рек: р. Клязьмы – от г. Владимира до впадения в р. Оку – и р. Пекша, притока р. Клязьмы. Оценка велась без учета конкретных предприятий-загрязнителей, из отложений выделялась фракция менее 0,020 мм, определялось содержание указанных элементов и полученные значения ранжировались по классификации классов загрязнения (игео-классы), уровням техногенной нагрузки и суммарному показателю токсического загрязнения. На исследуемом участке Клязьмы расположены города Ковров (140 тыс. чел.), Вязники (36 тыс. чел.) и Гороховец (13 тыс. чел.). Представлена общая картина загрязнения донных отложений Клязьмы ниже г. Владимира, из которой можно сделать вывод, что, несмотря на имеющиеся источники загрязнения, говорить об опасной нагрузке на сегодняшний день не приходится. Наивысший уровень загрязнения Пекши отмечен в верхнем течении, на выходе из города Кольчугино (40 тыс.чел). Вниз по течению уровни загрязнения значительно снижаются – происходит самоочищение ввиду отсутствия активных источников загрязнения. Сопоставление с загрязнением донных отложений р. Клязьмы в месте впадения р. Пекши указывает на отсутствие загрязнения со стороны Пекши, поскольку уровень загрязнения Клязьмы выше.*

*Техногенная нагрузка, донные отложения, тяжелые металлы, загрязнение, река Клязьма, река Пекша, игео-классы, сорбирующая фракция, экологический мониторинг.*