

УДК 556.55(470)

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО И КАМСКОГО КАСКАДОВ В НАЧАЛЕ XXI СТОЛЕТИЯ

© 2023 г. С. В. Ясинский<sup>а</sup>, \*, И. С. Соболев<sup>б</sup>, Д. Н. Хохлов<sup>б</sup>, М. А. Фасахов<sup>с</sup>, А. А. Шайдулина<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>с</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

\*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.06.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Гидроэнергетика — важный фактор экономического развития страны, особенно учитывая, что она обеспечивает пиковые нагрузки в электрической сети, чего не могут сделать тепловые и атомные электростанции. Вместе с тем создание ГЭС и связанных с ними водохранилищ приводит к целому ряду проблем. В основном экологических (затопление больших площадей, нередко занятых ценными сельскохозяйственными угодьями, ущерб рыбному стаду и др.). Поэтому важно знать, насколько эффективно работают гидроэлектростанции. Попытка решить такую задачу принята в данной статье на примере Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ. Представлены основные сведения о них — площади зеркала, полном и полезном объемах, средней проектной выработке электроэнергии. Оценен вклад рассмотренных каскадов в выработку электроэнергии всего Волжско-Камского каскада водохранилищ. Сформированы ряды данных о годовом притоке, сбросе воды через гидроузлы и выработке на них электроэнергии с 2002 по 2021 г., по ряду станций с 2004 по 2022 г. Показана связь площади водохранилищ с их объемом, а также выработки электроэнергии с водностью отдельных лет и периодов. Установлена связь притока воды в водохранилища с ее сбросом через турбины ГЭС. Особое внимание уделено Рыбинскому водохранилищу, осуществляющему многолетнее регулирование стока. Рассчитана выработка электроэнергии в многоводные, средние по водности и маловодные годы. Оценено отклонение фактической выработки электроэнергии от средней проектной, на основании чего сделан вывод об эффективности работы ГЭС. Определена вероятность выработки электроэнергии в зависимости от прогнозных значений речного стока.

**Ключевые слова:** водохранилище, ГЭС, выработка электроэнергии, эффективность функционирования, годы разной водности, Верхневолжский и Камский каскады

**DOI:** 10.31857/S2587556623060146, **EDN:** APSVIX

### ВВЕДЕНИЕ

Естественный режим речного стока далеко не всегда удобен для решения водных и других проблем. Так, на территории Русской равнины большая часть стока приходится на сравнительно кратковременный период весеннего половодья, тогда как основные потребности в воде имеют место в другие сезоны года. Нередки и маловодные годы. Это в полной мере относится к Верхней Волге и Каме и в целом к волжскому бассейну. В связи с этим еще в начале XX столетия возникла идея масштабного гидротехнического регулирования речного стока и создания Волжско-Камского каскада водохранилищ, составными частями которого стали Верхневолжский и Камский

каскады, рассматриваемые в данной статье, хотя необходимо отметить, что малые водохранилища и пруды создавались в рассматриваемом регионе уже давно. Масштабное же регулирование стока началось в конце 1930-х годов с создания Ивановского, Рыбинского и Угличского гидроузлов. Если основной целью Ивановского водохранилища и выходящего из него канала им. Москвы было обеспечение водой Московской агломерации, то Рыбинского и Угличского, а затем и других водохранилищ — обеспечение работы созданных на них ГЭС и удовлетворение острой потребности в электроэнергии населения и хозяйства европейской части страны, тем более пиковой, которую не могут обеспечить тепловые и атомные

станции. Конечно, попутно решались и проблемы удовлетворения потребностей в воде и других отраслей хозяйства.

Наряду с очевидными достоинствами создания водохранилищ имеется и целый ряд негативных последствий, среди которых затопление и подтопление сельскохозяйственных угодий, а нередко и застроенных территорий, население которых приходилось переселять, нарушение условий обитания водной и наземной фауны и др. Нередко высказывается мнение, что в наше время Волжско-Камский каскад в существующем ныне виде вряд ли был бы построен, а ряд уже созданных водохранилищ, особенно Рыбинское, приведшее к затоплению больших территорий, следовало бы полностью или частично спустить. Убедительный ответ на эти высказывания дал известный исследователь водохранилищ А.Б. Авакян (1991), который, не отрицая ряда негативных последствий их создания, показал, что, раз уж водохранилища Волжско-Камского каскада существуют, необходимо думать о совершенствовании их работы, а не об их спуске из-за чрезвычайно негативных последствий этого спуска как для сложившегося хозяйства в бассейне Волги, так и для экологических условий.

Не останавливаясь на всех последствиях создания водохранилищ, которых очень много, как положительных, так и отрицательных, основное внимание в данной статье уделим энергетическим аспектам.

Как известно, водохранилища осуществляют в основном сезонное, реже многолетнее регулирование стока, обычно имеет место и суточное регулирование стока (дважды в день меняется гидродинамический режим реки), что в значительной степени определяется спецификой работы ГЭС. В утренние и вечерние часы увеличивается расход воды через водоводы, а днем и ночью, в нерабочие часы и в праздники — сокращается практически до нуля (Эдельштейн, 1998). Очевидно, что ГЭС Волжско-Камского каскада играют очень важную роль в энергетическом балансе Европейской территории страны. Однако возможности дальнейшего увеличения выработки гидроэлектроэнергии здесь практически исчерпаны. Некоторым резервом этого увеличения, по мнению В.М. Евстигнеева (2008), могло бы стать наращивание установленной мощности на действующей Чебоксарской ГЭС (с 1.37 до 1.96 млн кВт) и возрождение малой энергетики. Увеличение выработки на Чебоксарской ГЭС связано с решением проблемы поднятия нормального подпорного уровня (НПУ) с современной отметки 63 м БС до

запланированной в первоначальном проекте отметки в 68 м. Дискуссии об этой проблеме длятся уже около 30 лет и связаны они с тем, что повышение уровня воды этого водохранилища при отметке 68 м БС приведет к затоплению больших по площади прибрежных территорий, в том числе и подтоплению крупных городов, таких как Нижний Новгород, а также возникновению ряда других экологических проблем (Захаров, Алексеев, 2012; Орехов, Краснов, 2013). Дискуссии по данной проблеме все еще продолжаются. Создание системы защитных сооружений может способствовать решению проблемы потопления территории, а подъем уровня воды на 5 м позволит кроме увеличения установленной мощности этой ГЭС в значительной степени решить транспортную проблему на участке от плотины Горьковской ГЭС до Нижнего Новгорода. Но все аспекты этой проблемы нужно оценивать с научной точки зрения и прогнозировать последствия их решения. Пока же будем ориентироваться на отметку НПУ 63 м.

Во многом аналогичная ситуация и с другим возможным источником увеличения выработки электроэнергии на каскаде — повышением проектного уровня НПУ Нижнекамского водохранилища, построенного в 1979 г., до 68 м БСВ (в настоящее время 63 м).

Что касается малой гидроэнергетики, то ее достоинства и преимущества в экономическом развитии России хорошо показаны в монографии Л.К. Малик (2005), в которой рассмотрены перспективные створы для создания 50 малых ГЭС. В настоящее время в рамках развития малой гидроэнергетики в стране на р. Кубани уже создан каскад Красногорских малых ГЭС (Мирзоев, Слива, 2019). Определенные возможности повышения выработки электроэнергии заложены в оптимизации использования водных ресурсов самих водохранилищ Волжско-Камского каскада (Левит-Гуревич, 2012). В этой связи основной целью данной работы является оценка энергетической эффективности функционирования Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ в годовом разрезе. Особенности выработки электроэнергии на ГЭС по отдельным сезонам и времени суток заслуживают особого внимания, что выходит за рамки данной статьи.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно водохозяйственному районированию России, на ее территории образован 21 бассейновый округ. Рассматриваемые каскады водо-

**Таблица 1.** Основные параметры и проектные значения выработки электроэнергии на ГЭС Верхневолжских и Камских водохранилищ при нормальном подпорном уровне

| Водохранилище               | Параметры<br>при нормальном подпорном уровне |                               |                                 | Средняя проектная<br>выработка<br>электроэнергии,<br>млн кВт ч |
|-----------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                             | площадь зеркала, км <sup>2</sup>             | полный объем, км <sup>3</sup> | полезный объем, км <sup>3</sup> |                                                                |
| Водохранилища Верхней Волги |                                              |                               |                                 |                                                                |
| Иваньковское                | 316                                          | 1.12                          | 0.89                            | 119                                                            |
| Угличское                   | 249                                          | 1.25                          | 0.81                            | 240                                                            |
| Рыбинское                   | 4550                                         | 25.40                         | 16.70                           | 900                                                            |
| Горьковское                 | 1591                                         | 8.82                          | 2.78                            | 1500                                                           |
| Чебоксарское                | 1080                                         | 5.10                          | —                               | 2100                                                           |
| Всего                       | 7786                                         | 41.69                         | 21.18                           | 4859                                                           |
| Водохранилища на Каме       |                                              |                               |                                 |                                                                |
| Камское                     | 1915                                         | 12.2                          | 9.8                             | 2020                                                           |
| Воткинское                  | 1120                                         | 9.4                           | 4.45                            | 2630                                                           |
| Нижнекамское                | 1370                                         | 4.2                           | 0.77                            | 1800                                                           |
| Всего                       | 4405                                         | 25.8                          | 15.02                           | 6450                                                           |
| Суммарно по двум каскадам   | 12191                                        | 67.49                         | 36.20                           | 11309                                                          |

*Источник.* Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения 10.03.2023); (Водохранилища ..., 2008; Эдельштейн, 1998).

хранилищ входят в Верхневолжский и Камский бассейновые округа<sup>1</sup>.

В качестве критерия эффективности функционирования рассматриваемых каскадов водохранилищ использованы оценки отклонения фактической выработки электроэнергии на соответствующих ГЭС от средней проектной. Основные сведения о водохранилищах и ГЭС по-

черпнуты из (Водохранилища ..., 2008; Информационная ...<sup>2</sup>; Правила ..., 2014, 2016).

Попутно анализу подверглись такие факторы выработки гидроэнергии на рассматриваемых ГЭС, как приток воды в водохранилища и сброс ее из них. Проанализированы как отдельные годы, группы лет различной водности, так и рассматриваемые периоды в целом.

<sup>1</sup> Водный кодекс РФ, Федеральный закон № 74 от 03.06.2006, с изменениями на 28.04.2023.

<sup>2</sup> Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 10.03.2023).



**Рис. 1.** Площадь зеркала и полный объем (при нормальном подпорном уровне) водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов.

Для анализа функционирования рассматриваемых каскадов водохранилищ на рр. Волге и Каме сформированы ряды данных о годовых притоке, сбросе воды через гидроузлы и выработке на них электроэнергии с 2002 по 2021 г., по ряду станций с 2004 по 2022 г. (Информационная ...<sup>2</sup>; Научно-прикладной ..., 2017, 2021). К сожалению, не для всех водохранилищ удалось получить необходимую полную информацию за все эти годы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая площадь зеркала рассматриваемых водохранилищ превышает 12 тыс. км<sup>2</sup> (табл. 1), из которых примерно 60% площади зеркала, полного и полезного объемов и немногим более 40% проектной выработки электроэнергии приходится на Верхневолжский каскад водохранилищ. Самым крупным по площади, полному и полезному объемам является Рыбинское, которое в отличие от остальных осуществляет многолетнее регулирование стока. Однако по проектной выработке электроэнергии Рыбинская ГЭС занимает довольно скромное место в каскаде. Режим работы остальных водохранилищ — в основном сезонное и суточное регулирование стока. По размерам проектной выработки электроэнергии выделяется Воткинская ГЭС. В итоге оба каскада должны

вырабатывать примерно 30% общей выработки Волжско-Камского каскада.

Анализ соотношения площади зеркала водохранилищ и их объемов показывает, что в целом, чем больше площадь зеркала, тем больше полный объем (рис. 1). Гораздо менее выражена связь площади зеркала с размером полезного объема. Не наблюдается прямой зависимости проектной выработки электроэнергии от объема водохранилищ (рис. 2). При значительных объемах воды в Горьковском, Камском и особенно Рыбинском водохранилищах их планируемая выработка электроэнергии даже ниже, чем в меньших по объему воды Чебоксарском, Нижнекамском и, особенно, Воткинском водохранилищах.

Очевидно, что выработка электроэнергии во многом зависит от величины стока, что хорошо видно на примере Рыбинской и Воткинской ГЭС (рис. 3). Очень важно, что сток за рассматриваемый период был выше средних многолетних значений, хотя отдельные годы отличались пониженными значениями (рис. 4). Определенное влияние на выработку электроэнергии оказывает соотношение притока к водохранилищам и сброса воды. Для большинства лет и водохранилищ это соотношение несколько больше единицы из-за того, что часть поступающей воды расходуется

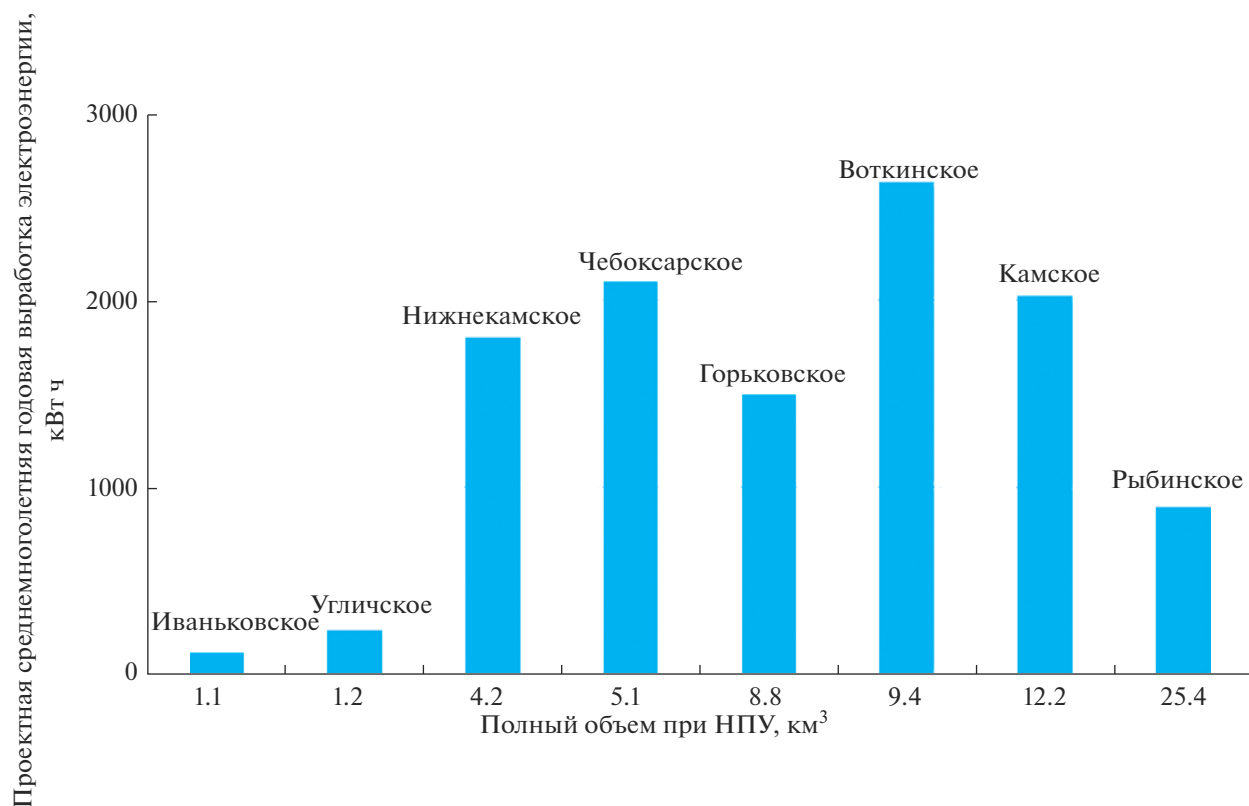


Рис. 2. Проектная среднегодовая выработка электроэнергии и полный объем (при нормальном подпорном уровне) водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов.

на испарение с акватории, на нужды различных потребителей. Но в ряде случаев наблюдается обратная картина, например, в случае необходимости холостых сбросов при наступлении чрезвычайных ситуаций. Это наиболее характерно для водохранилищ многолетнего регулирования стока, каким является Рыбинское водохранилище (табл. 2). Указанное соотношение во многом зависит от положения стока конкретного года в гидрологическом ряду и запросов со стороны водопотребителей и водопользователей районов, расположенных ниже по течению.

Возвращаясь к теме влияния величины стока на выработку электроэнергии, отметим, что повышенный сток за рассматриваемый период во многом определил и повышенную в целом выработку электроэнергии за этот период, особенно в многоводные годы. Наиболее достоверную оценку такого влияния водности на выработку электроэнергии можно получить по данным нескольких лет, объединенных в группы различной водности. Это сделано в табл. 3. В многоводные годы фактическая выработка электроэнергии на всех

ГЭС превышает запланированную в проекте. Причем наибольшее отклонение на Верхневолжском каскаде отмечается на Рыбинской ГЭС (больше чем на 50%), на Камском — на Воткинской ГЭС (почти на 22%); наименьшее — на ГЭС Угличского и Нижнекамского водохранилищ. В средние по водности годы фактическая выработка электроэнергии наиболее близка к проектной, с наибольшим превышением на ГЭС Рыбинского водохранилища. Также наиболее существенно отклонение от проектных значений в средние по водности годы на Угличской и Воткинской ГЭС. В маловодные годы происходит недовыработка электроэнергии на 10–15% на обоих каскадах.

Обобщенное представление о вероятности выработки определенного количества электроэнергии в зависимости от сброса воды через турбины ГЭС дают рис. 5 и 6. Данные графики могут быть использованы в прогнозах выработки электроэнергии на рассматриваемых ГЭС с учетом рассчитанного или прогнозного значения сброса воды через них.

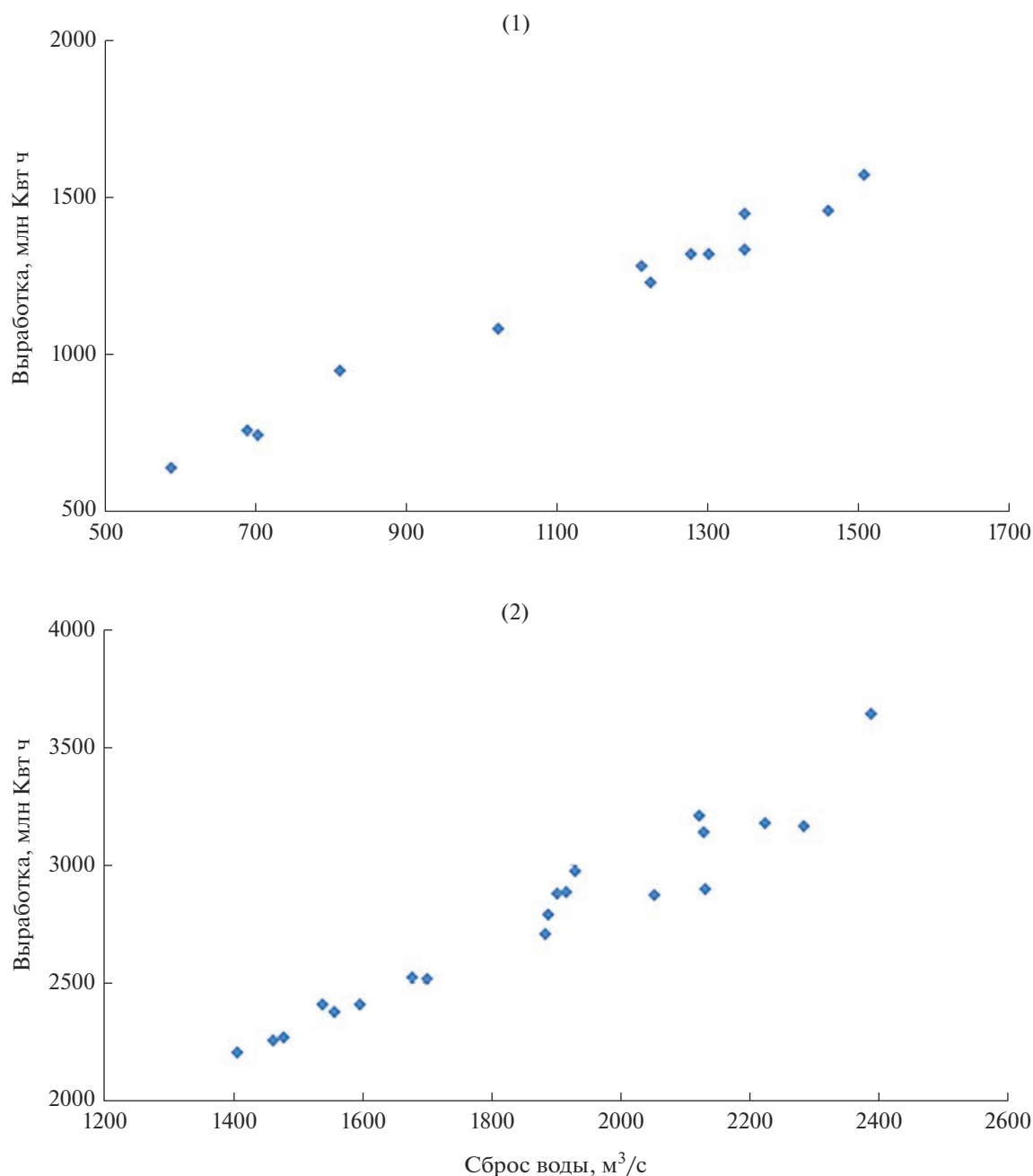
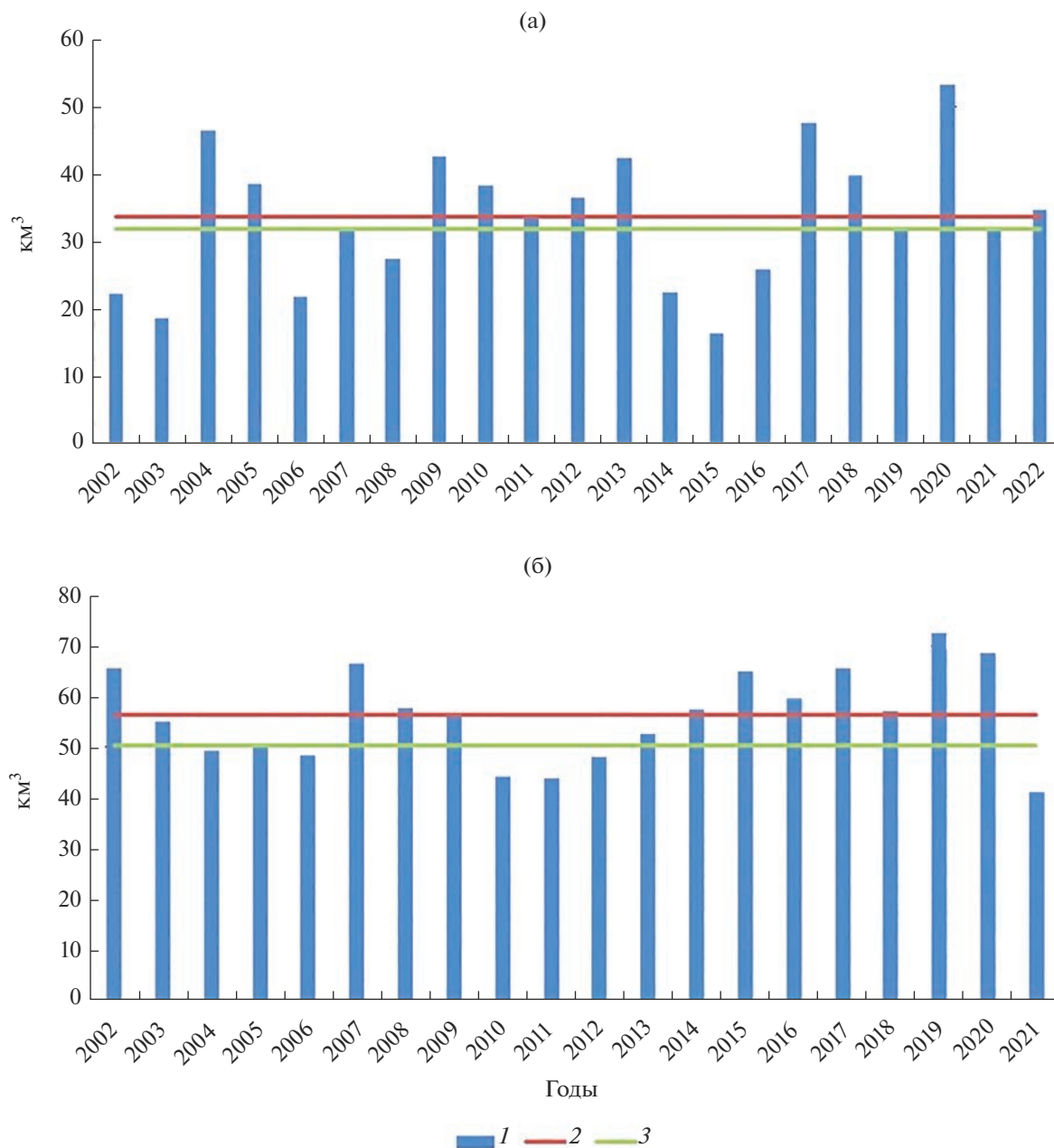


Рис. 3. Зависимость выработки электроэнергии от сброса воды на Рыбинской (1) и Воткинской (2) ГЭС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали, что на долю Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ приходится около 30% выработки электроэнергии на всем Волжско-Камском каскаде. Для большинства водохранилищ этих каскадов прослеживается связь между их полным объемом и площадью акватории. Однако не выявлено за-

висимости между объемами воды в водохранилищах и величиной выработанной электроэнергии. На Верхней Волге и Каме в начале XXI в. выявлена в целом повышенная величина стока по сравнению с его нормой, что способствовало повышению выработки электроэнергии на ГЭС обоих рассматриваемых каскадов, хотя был и целый ряд маловодных лет. Как правило, на большинстве



**Рис. 4.** Динамика сброса воды через агрегаты Рыбинской (а) и Камской (б) ГЭС. 1 — годовой сброс; 2 — средний сброс за период; 3 — норма стока в створах ГЭС.  
Составлено по: (Ресурсы ..., 2021).

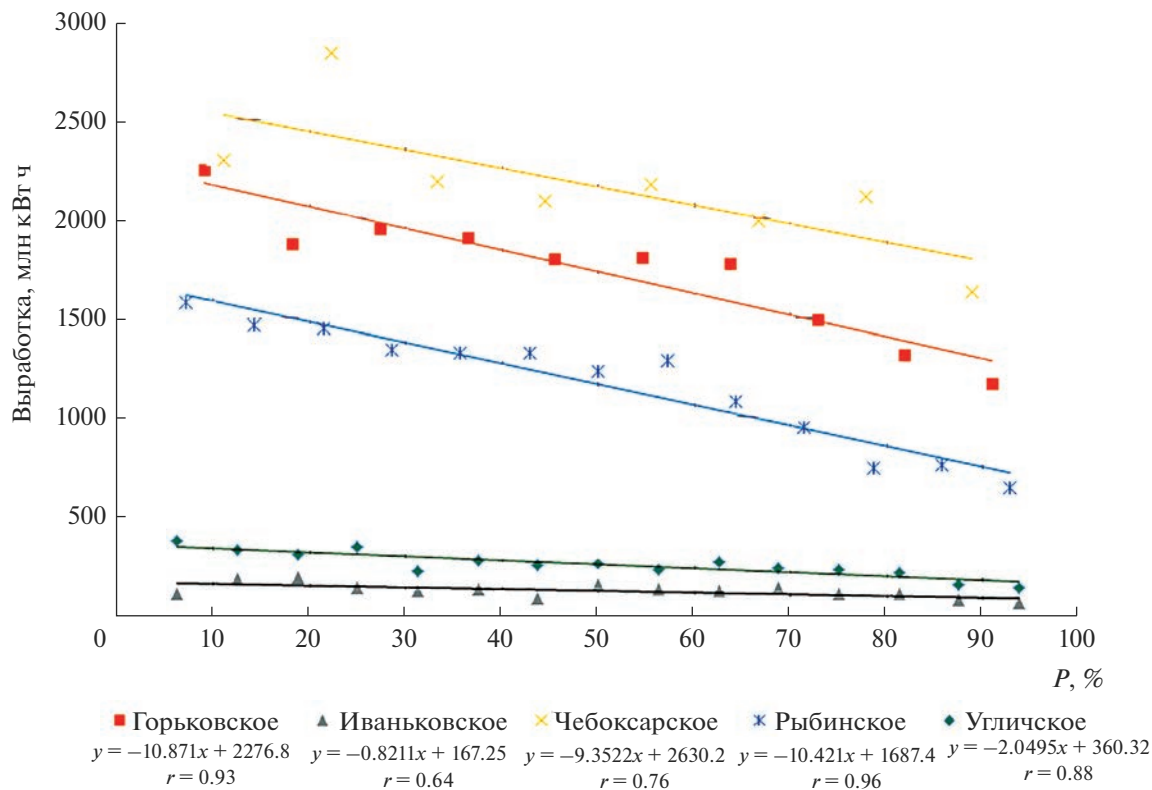
водохранилищ и в большинстве лет приток воды несколько превышает сброс воды. Обратная ситуация чаще всего складывается на Рыбинском водохранилище, осуществляющем многолетнее регулирование стока. В многоводные годы фактическая выработка электроэнергии на всех ГЭС превышает среднюю запланированную в их проектах, причем на ГЭС Рыбинского водохранилища — более чем на 50%. В маловодные годы выработка электроэнергии в целом не достигает сред-

ней проектной на 10–15%. В средние по водности периоды фактическая выработка электроэнергии близка к проектной, с наибольшим превышением на ГЭС Рыбинского водохранилища. В будущем полученные показатели эффективности работы рассмотренных ГЭС могут быть скорректированы в зависимости от возможных гидроклиматических изменений и изменений экономической ситуации в регионе.

**Таблица 2.** Соотношение притока и сброса воды в Рыбинском водохранилище, км<sup>3</sup>

| Год               | Суммарный приток | Суммарный сброс | Водохозяйственный баланс |
|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------|
| 2004              | 46.04            | 46.4            | −0.36                    |
| 2005              | 33.55            | 38.57           | −5.02                    |
| 2006              | 29.61            | 21.8            | 7.81                     |
| 2007              | 24.98            | 31.85           | −6.87                    |
| 2008              | 33.92            | 27.53           | 6.39                     |
| 2009              | 41.51            | 42.66           | −1.15                    |
| 2010              | 34.69            | 38.33           | −3.64                    |
| 2011              | 33.43            | 33.63           | −0.2                     |
| 2012              | 43.577           | 36.481          | 7.096                    |
| 2013              | 37.201           | 42.412          | −5.2                     |
| 2014              | 17.258           | 22.458          | −5.2                     |
| 2015              | 21.766           | 16.412          | 5.354                    |
| 2016              | 29.922           | 25.828          | 4.094                    |
| 2017              | 51.075           | 47.555          | 3.52                     |
| 2018              | 32.973           | 40.155          | −7.182                   |
| 2019              | 38.158           | 32.299          | 5.859                    |
| 2020              | 49.488           | 53.346          | −3.858                   |
| 2021              | 32.506           | 31.515          | 0.991                    |
| 2022              | 32.956           | 34.711          | −1.755                   |
| Среднее за период | 34.98            | 34.94           | 0.04                     |

Источник: (Научно-прикладной ..., 2017; Ресурсы ..., 2021).

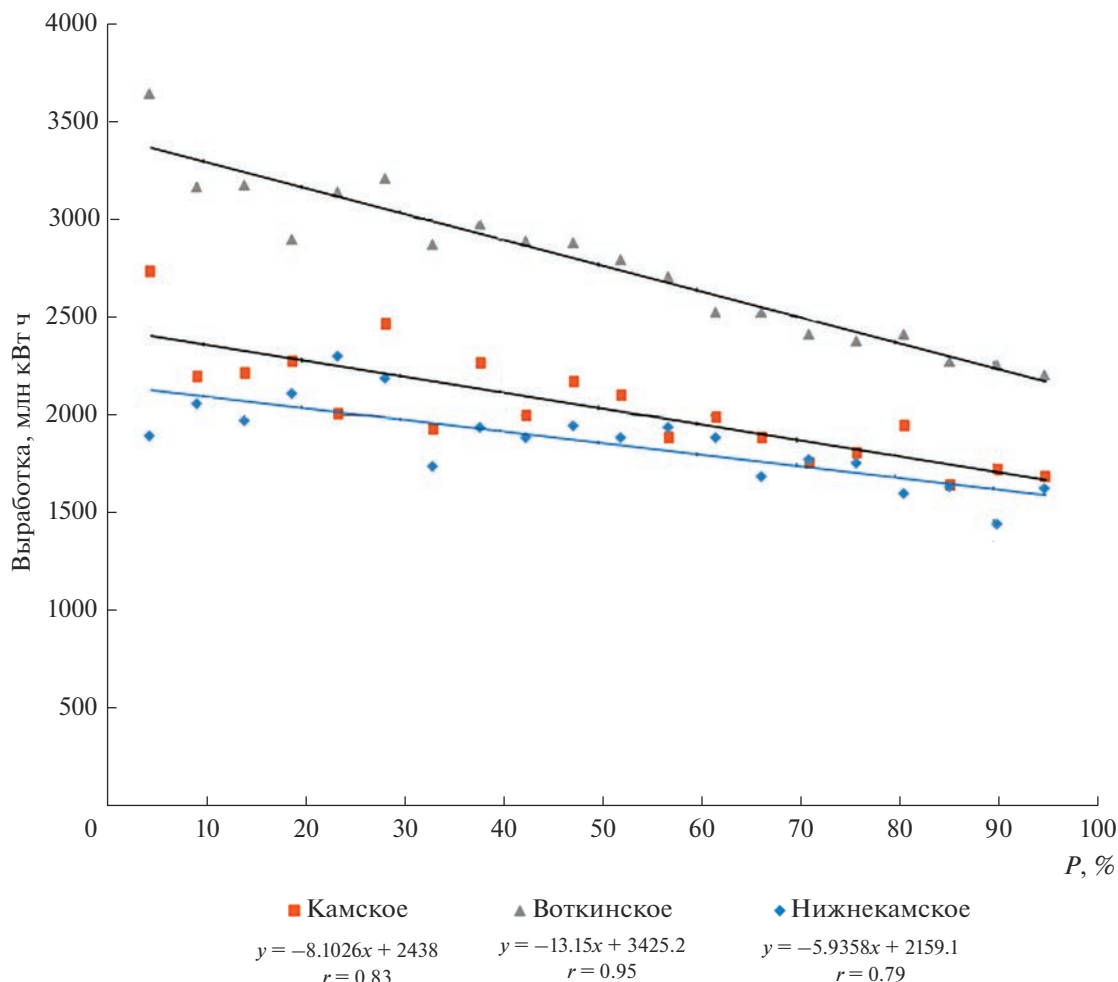


**Рис. 5.** Вероятность выработки электроэнергии на ГЭС водохранилищ Верхней Волги в зависимости от сброса воды в годы разной обеспеченности его превышения в гидрологическом ряду.

**Таблица 3.** Выработка электроэнергии и сброс воды в нижний бьеф водохранилищ Верхней Волги и Камы в различные по водности годы

| Показатель                                      | Водохранилища ГЭС Верхней Волги |           |           |             |              | Водохранилища ГЭС Камы |            |              |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|------------------------|------------|--------------|
|                                                 | Иваньковское                    | Угличское | Рыбинское | Горьковское | Чебоксарское | Камское                | Воткинское | Нижнекамское |
| Проектная выработка электроэнергии, млн кВт ч   | 119                             | 240       | 900       | 1500        | 2100         | 2020                   | 2630       | 1800         |
| Многоводные годы                                |                                 |           |           |             |              |                        |            |              |
| Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч | 151.1                           | 316.1     | 1427.9    | 1995.1      | 2437.0       | 2313.2                 | 3205.5     | 2037.7       |
| Среднегодовой сброс воды, м <sup>3</sup> /с     | 374.3                           | 518.0     | 1395.4    | 1965.8      | 4065.7       | 2134.6                 | 2216.3     | 3514.4       |
| % от проектной выработки                        | 127.0                           | 131.7     | 158.7     | 133.0       | 116.0        | 114.5                  | 121.9      | 113.2        |
| Средние по водности годы                        |                                 |           |           |             |              |                        |            |              |
| Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч | 127.0                           | 260.3     | 1229.9    | 1791.9      | 2082.7       | 2047.4                 | 2806.0     | 1879.1       |
| Среднегодовой сброс воды, м <sup>3</sup> /с     | 261.0                           | 368.0     | 1185.8    | 1696.0      | 3232.0       | 1797.4                 | 1899.6     | 2832.8       |
| % от проектной выработки                        | 106.7                           | 108.5     | 136.7     | 119.0       | 99.2         | 101.4                  | 106.7      | 104.4        |
| Маловодные годы                                 |                                 |           |           |             |              |                        |            |              |
| Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч | 100.5                           | 197.1     | 775.9     | 1325.5      | 1871.0       | 1778.1                 | 2354.1     | 1638.1       |
| Среднегодовой сброс воды, м <sup>3</sup> /с     | 168.0                           | 258.0     | 698.9     | 1167.8      | 2501.7       | 1474.1                 | 1534.5     | 2260.7       |
| % от проектной выработки                        | 84.5                            | 82.1      | 86.2      | 88.4        | 89.1         | 88.0                   | 89.5       | 91.0         |

Источник: (Научно-прикладной ..., 2021; Правила ..., 2016, 2014).



**Рис. 6.** Вероятность выработки электроэнергии на ГЭС водохранилищ Камы в зависимости от сброса воды в годы раз-ной обеспеченности его превышения в гидрологическом ряду.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях”.

## FINANCING

The work was carried out with financial support of the Russian Science Foundation grant 22-17-00224 “Formation of hydrological and geochemical processes in the catchment areas of the cascades of the Upper Volga and Kama reservoirs under various land use scenarios and climate changes in their territories.”

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян А.Б. Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ // Гидротехн. стр-во. 1991. № 8. С. 1–8.

Водоохранилища Верхней Волги / рук. В.С. Дементьев. Нижний Новгород: Верхне-Волжское БВУ, 2008. 156 с.

Евстигнеев В.М. Современный гидроэнергетический потенциал и тенденции его использования // Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. С. 175–183.

Захаров А.В., Алексеев И.А. Социально-экологические проблемы Чебоксарского водохранилища // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 5. С. 90–101.

Левит-Гуревич Л.К. Рациональное управление водными ресурсами водохранилищ на примере Волжско-Камского каскада // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. № 1 (9). С. 2343–2354.

Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.

Мирзоев М.И., Слива И.В. Проект строительства Краснотуркменских малых ГЭС на р. Кубань // Гидротехника. 2019. № 3 (56). С. 8–11.

- Научно-прикладной справочник Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: "ООО РПЦ Офорт", 2017. 132 с.
- Орехов В.Ф., Краснов А.Н. Проблемы Чебоксарского водохранилища // Астраханской вестн. экологического образования. 2013. № 3 (25). С. 170–184.
- Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. М.: Федеральное агентство водных ресурсов, 2016. 202 с.
- Правила использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме. М.: Федеральное агентство водных ресурсов, 2014. 132 с.
- Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество (Справочное издание). СПб., 2021. 153 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

## Energy Efficiency Assessment of the Upper Volga and Kama Cascades of Reservoirs at the Beginning of the 21st Century

S. V. Yasinsky<sup>1, \*</sup>, I. S. Sobol<sup>2</sup>, D. N. Khokhlov<sup>2</sup>, M. A. Fasakhov<sup>3</sup>, and A. A. Shaydulina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>3</sup>*Perm State University, Perm, Russia*

\*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Basic information about the Upper Volga and Kama cascades of reservoirs is presented: water surface area, full and useful volume capacity, and average project power generation. The contribution of the considered cascades to the power generation of the entire Volga–Kama cascade of reservoirs is estimated. Data series have been generated on the annual inflow, discharge of water through hydroelectric facilities, and generation of electricity from 2002 to 2021, for several stations from 2004 to 2022. The relationship between the area of reservoirs and their capacity is shown, as well as the generation of electricity with the water content of individual years and periods. A relationship has been established between the inflow of water into the reservoirs and its discharge through the turbines of the hydroelectric power plants. Particular attention is paid to the Rybinsk reservoir, which performs over-year water storage. The generation of electricity in high-water, medium-water, and low-water years is calculated. The deviation of the actual electricity generation from the average design was estimated, based on which a conclusion was made about the efficiency of the hydroelectric power plants. The probability of electricity generation is determined depending on the predicted values of the river runoff.

**Keywords:** reservoir, hydroelectric power station, power generation, efficiency, years of different water content, Upper Volga and Kama cascades

## REFERENCES

- Avakyan A.B. National economic and environmental consequences of the descent of reservoirs. *Gidrotekh. Stroitel.*, 1991, no. 8, pp. 1–8. (In Russ.).
- Edelshtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: Environmental Problems, Ways to Solve Them]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 277 p.
- Evstigneev V.M. Modern hydropower potential and trends in its use. In *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechenosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh po-tepleniya XXI veka* [Forecast of Climatic Resource Availability of the East-European Plain in the Conditions of Warming of the 21st Century]. Moscow: Max-Press Publ., 2008, pp. 175–183. (In Russ.).
- Levit-Gurevich L.K. Rational management of water resources of reservoirs on the example of the Volga–Kama cascade. *Izv. Samar. Nauch. Tsentra RAN*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 2343–2354. (In Russ.).
- Malik L.K. *Fakty riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Problemy bezopasnosti* [Risk Factors for Damage to Hydraulic Structures. Security Issues]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 354 p.
- Mirzoev M.I., Sliva I.V. The project for the construction of Krasnogorsk small hydroelectric power stations on the river. *Kuban. Hydrotech.*, 2019, vol. 56, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).
- Nauchno-prikladnoi spravochnik Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Scientific and Applied Handbook Long-term Fluctuations and Variability of Water Resources and the Main Characteristics of the Flow of Rivers in the Russian Federation]. Georgievsky V.Yu., Ed. St. Petersburg: Rial Publ., 2021. 190 p.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kharakteristiki pritoka vody v krupneishie vodokhranilishcha* [Scientific and Applied Handbook: Long-term Characteristics of Water Inflow into the Largest Reservoirs]. Geor-

- gievsky V.Yu., Ed. St. Petersburg: "ООО RPTS Ofort" Publ., 2017. 132 p.
- Orekhov V.F., Krasnov A.N. Problems of the Cheboksary reservoir. *Astrakh. Vestn. Ekol. Obraz.*, 2013, vol. 25, no. 3, pp. 170–184. (In Russ.).
- Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch na r. Kame* [Rules for the Use of Water Resources of the Kama and Votkinsk Reservoirs on the Kama River]. Moscow: Fed. Ag. Vodn. Resur. Publ., 2016. 202 p.
- Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Nizhnekamskogo vodokhranilishcha na r. Kame* [Rules for the Use of Water Resources of the Nizhnekamsk Reservoir on the Kama River]. Moscow: Fed. Ag. Vodn. Resur. Publ., 2014. 132 p.
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovaniye i kachestvo (Ezhegodnoe izdanie)* [Resources of Surface and Ground Waters, Their Use and Quality (Annual Edition)]. St. Petersburg, 2021. 153 p.
- Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Reservoirs of the Upper Volga]. Dementiev V.S., Ed. Nizhnii Novgorod: Verkhne-Volzhskoe BVU, 2008. 156 p.
- Zakharov A.V., Alekseev I.A. Socio-environmental problems of the Cheboksary reservoir. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 5, pp. 90–101. (In Russ.).