



УДК 556.5.06:621.311.21

**Е. Е. КОЖЕВНИКОВ**, аспирант кафедры градостроительство, инженерные сети и системы; **С. Е. ДЕНИСОВ**, д-р техн. наук, проф. кафедры градостроительство, инженерные сети и системы

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В УСЛОВИЯХ ЗАРЕГУЛИРОВАННОСТИ ВОДОИСТОЧНИКА**

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76. Тел.: (351) 267-91-44, +7 (905) 837-51-46; эл. почта: kozhevnikovvee@susu.ru

*Ключевые слова:* прогноз речного стока, краткосрочный прогноз, долгосрочный прогноз, метод оптимизации роя частиц.

---

*Представлена разработанная программа, основанная на крупномасштабной и расширяемой системе прогнозирования стока и оптимизации бассейнов рек. Результаты оптимизации, получаемые в ходе работы данной программы, для каскадных ГЭС сформированы с использованием оптимизации роя частиц на основе сгенерированных прогнозов речного стока и ограничений бассейна.*

---

### **Введение**

Прогнозирование стока источников водоснабжения крайне важно для управления системами водоснабжения. Полученные результаты прогнозов и оптимизации вместе с автоматически собираемыми данными из внешних систем хранятся в центральной базе данных и доступны через приложение с графическим интерфейсом пользователя.

В условиях быстрорастущего спроса на электроэнергию все больше проявляется интерес к возобновляемым источникам энергии ввиду их ключевых преимуществ относительно традиционных источников. Одним из ключевых преимуществ возобновляемых источников здесь можно выделить их экологичность. Хотя такие источники и оказывают значительно меньшее влияние на окружающую среду, однако и они требуют обеспечения непрерывного контроля за состоянием природной среды (речной экосистемы), в основе которого лежит мониторинг и прогнозирование в различных организационных формах.

Для этих целей в условиях оптимальной и эффективной работы ГЭС, установленных на одной реке, их эксплуатацию необходимо производить с использованием централизованной системы прогнозирования речного стока и оптимизации бассейна реки [1].

Поэтому в данной статье мы представляем разработанную нами интегрированную программу на основе системы прогнозирования речного стока и оптимизации бассейнов рек. Система имеет необходимые компоненты для сбора данных, прогноза речного стока, оптимизации бассейна реки и визуализации и представления результатов (т. е. графический пользовательский интерфейс (*GUI*)). Программа представляет собой полностью автоматизированную и оперативную систему поддержки принятия решений, которая позволит выдержать компромисс между наибольшей выработкой электроэнергии и воздействием на речную



экосистему, являющуюся источником водоснабжения. Данная система может быть внедрена для любого выбранного бассейна в Челябинской области.

Режим речного стока и речная система демонстрируют значительную нестационарность и стохастичность. Учитывая сложный характер речного стока и его изменчивость, программа и нелинейные статистические и гидрологические модели прогнозирования рек, используемые в этой программе, являются подходящими моделями для такого стохастического процесса. Программа производит два основных типа прогнозов речного стока: долгосрочные прогнозы, которые используются модулем оптимизации для максимального производства энергии, и краткосрочные прогнозы, которые используются модулем оптимизации для снижения воздействия на речную экосистему и предотвращения последствий наводнений и паводков. Каждый из этих типов прогнозов, в свою очередь, использует несколько различных методов, включая гидрологические, контролируемое машинное обучение, гибридные и ансамблевые модели. Модели численного прогноза погоды (ЧПП) предсказывают погоду, используя математические модели атмосферы. ЧПП различных метеорологических моделей используются в методах прогнозирования речного стока, основанных на машинном обучении.

Аналогично модулям прогнозирования речного стока, модули оптимизации программы также производят долгосрочные и краткосрочные результаты для максимизации потребления энергии и предотвращения негативного воздействия на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС и последствий наводнений и паводков, соответственно.

Последним важным компонентом программы является его приложение с графическим интерфейсом пользователя (рис. 1), которое облегчает визуализацию данных (как собранных данных, так и сгенерированных результатов), автоматическое создание отчетов и ручной запуск моделей прогнозирования и оптимизации речного стока с использованием входных данных модели и параметров, настроенных экспертами в данной предметной области. Дополнительными средствами предоставления данных пользователям системы являются автоматические электронные письма с актуальными прогнозами речного стока и результатами оптимизации.

### **Прогноз речного стока**

Долгосрочные и краткосрочные прогнозы речного стока составляются для использования в долгосрочных и краткосрочных схемах оптимизации, которые выполняются периодически для максимизации энергии в балансе с минимизацией негативного воздействия на речную экосистему от работы ГЭС и предотвращения последствий наводнений и паводков, соответственно. Долгосрочные прогнозы охватывают 15 месяцев (требуется из-за операционных проблем) в месячном/ежедневном разрешении, а краткосрочные прогнозы охватывают от 3 до 10 дней в дневном/ежечасном разрешении.

Долгосрочные прогнозы речного стока выполняются с использованием трех различных подходов: искусственные нейронные сети (*ИНС*), *Support Vector Machines Model (SVM)* и *Hydrological Byrans Vattenbalans Model (HPV)*, где первые два из них представляют собой параметрические модели машинного обучения, а *HBV* – полураспределенная гидрологическая модель [2, 3].

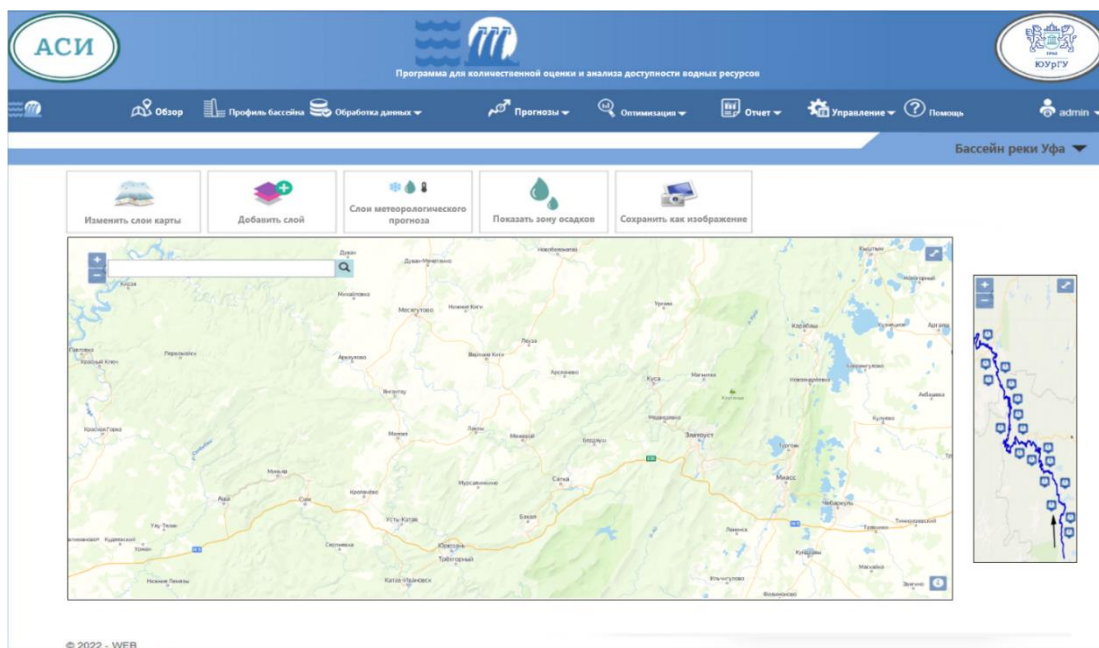


Рис. 1. Начальная страница приложения с графическим интерфейсом программы для количественной оценки и анализ доступности водных ресурсов

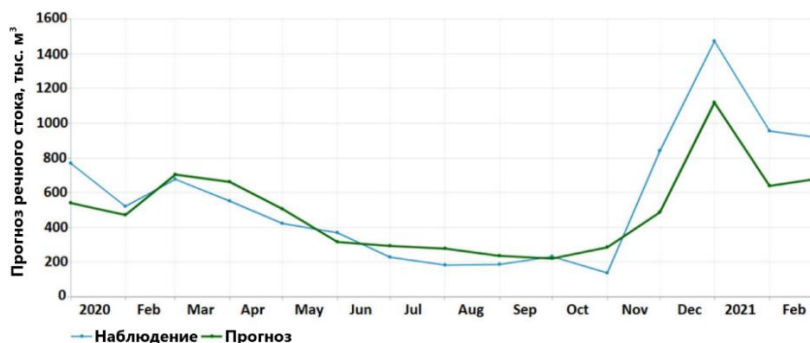


Рис. 2. Долгосрочный прогноз речного стока выбранной моделируемой ГЭС

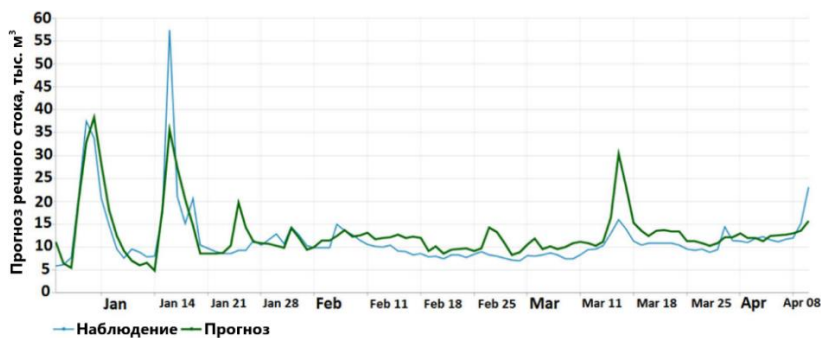


Рис. 3. Краткосрочный прогноз речного стока выбранной моделируемой ГЭС

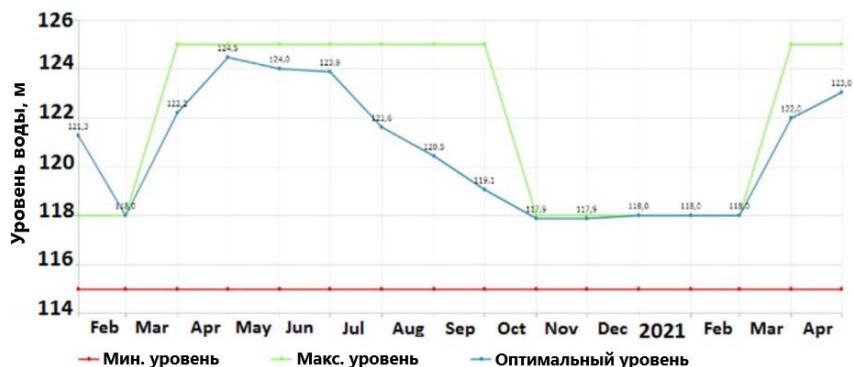


Рис. 4. Максимальный, минимальный и оптимальный уровни воды для водохранилища моделируемой выбранной ГЭС (долгосрочная оптимизация)

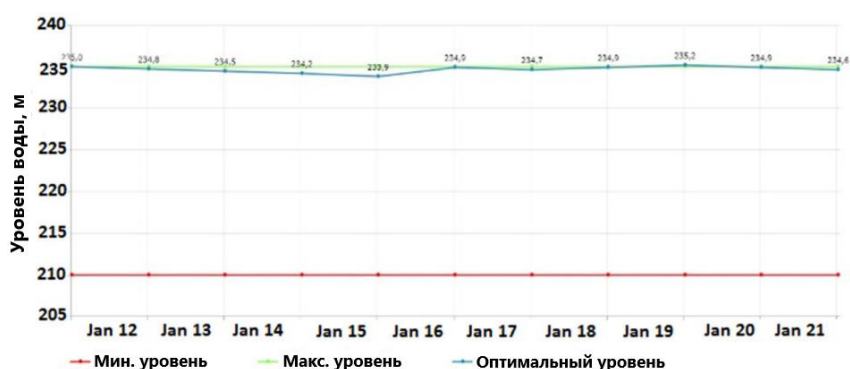


Рис. 5. Максимальный, минимальный и оптимальный уровни воды для водохранилища моделируемой выбранной ГЭС (краткосрочная оптимизация)

Эти три алгоритма используются в ансамблевой модели для получения четвертого комбинированного результата долгосрочного прогноза. Кроме того, для всех используемых моделей составляются вероятностные прогнозы [4].

В модели ИНС значения веса и размер шага определяются динамически, как указано в уравнении (1).

$$\omega_i^{(t)} = \omega_i^{(t-1)} - \eta^{(t-1)} \cdot \text{sgn} \left( \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial \omega_i^{(t-1)}} \right), \quad (1)$$

где  $\omega$  – значение веса;  $i$  – число веса;  $t$  – количество итераций;  $\eta$  – размер шага;  $E$  – функция ошибок.

Математическая модель SVM представлена уравнением (2).

$$y = \sum y_i a_j K(x_j, x) - b, \quad (2)$$

где  $y$  – выходной вектор;  $a$  – множитель Лагранжа;  $K$  – функция ядра, измеряющая сходство между  $x$  и  $x_j$ ;  $b$  – параметр сдвига.

Модель HBV – это полураспределенная модель, делящая бассейны на суббассейны и субрегионы в зависимости от высоты над уровнем моря. Общее уравнение водного баланса модели представлено уравнением (3).



$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + VL], \quad (3)$$

где  $P$  – количество выпавших осадков;  $E$  – суммарное испарение;  $Q$  – сток;  $SP$  – снежный покров;  $SM$  – влажность почвы;  $UZ$  – верхняя зона грунтовых вод;  $LZ$  – нижняя зона грунтовых вод;  $VL$  – объем водохранилища.

Все три отдельные модели используют в качестве входных данных результаты долгосрочного метеорологического прогнозирования интегрированной системы прогнозирования (ИСП) Гидрометцентра. Это ежедневные прогнозы, охватывающие в общей сложности 216 дней (~7 месяцев) для таких параметров, как общее количество осадков, температура, сток, влажность почвы и испарение.

Модели *ИНС* и *SVM* обучаются на основе ретроспективных прогнозов и данных о речном стоке, наблюдаемых с 1987 года. Долгосрочные прогнозы речного стока получены на основе обученных моделей на ~7 месяцев и, используя соотношение между прогнозами на эти 7 месяцев и средними наблюдаемыми значениями речного стока в данных с 1987 года, прогнозы продлеваются до 15 месяцев.

Гибридная модель ансамбля разработана на основе трех вышеупомянутых моделей прогнозирования, чтобы предоставить пользователям системы четвертый объединенный результат прогноза. Эта окончательная модель дает средневзвешенное значение выходных данных отдельных моделей. Веса определяются и периодически обновляются автоматически со значениями, обратно пропорциональными частоте ошибок в ретроспективных прогнозах.

Краткосрочные прогнозы речного стока выполняются с использованием трех различных подходов: *ИНС*, *SVM* и *Water Research Forecasting Model (WRF)*, где первые два из них представляют собой алгоритмы параметрического машинного обучения (аналогичные долгосрочным моделям), а *WRF* представляет собой полностью распределенную гидрологическую модель на основе сетки [5].

Все три отдельные краткосрочные модели используют выходные данные метеорологического прогноза на 3–10 дней из интегрированной системы прогнозирования (ИСП) Гидрометцентра, работающей с граничными условиями в качестве входных данных. Это почасовые прогнозы на срок до 10 дней для таких параметров, как общее количество осадков, температура, влажность почвы, поверхностное давление и эквивалент снеговой воды. Краткосрочные модели прогнозов обучаются с использованием самых последних 30-дневных метеорологических прогнозов и данных наблюдений за речным стоком. Для калибровки использовался набор данных приблизительно за 1 год.

### **Оптимизация водохранилищ в бассейне реки**

Модуль оптимизации бассейна реки производит долгосрочную максимизацию энергии и краткосрочную оптимизацию предотвращения негативного воздействия на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС, в том числе наводнений для каждого из водохранилищ в бассейне реки. Метод оптимизации роя частиц *PSO* используется модулем оптимизации из-за его преимуществ, таких как простота и эффективность [6]. Чтобы вычислить значение пригодности частиц в методе, ограничения рассматриваются как штрафные





условия, а затем добавляются к значению целевой функции, представленной в уравнении (4).

$$f = F + \sum_{i=1}^I \mu_i T_i^2, \quad (4)$$

где  $F$  – минимизируемая целевая функция;  $\mu_i$  – штрафной коэффициент ограничения;  $T_i^2$  – кумулятивный штрафной член.

Долгосрочная оптимизация выполняется для максимизации энергии в течение 15 месяцев для всех водохранилищ, расположенных в каскадной структуре бассейна. Выходные данные включают в себя оптимизированные месячные уровни воды для всего диапазона.

В первую очередь рои частиц создаются для уровней воды в водоемах между максимальным и минимальным значениями [7]. Затем уравнение потока (5) решается с использованием таких ограничений, как количество воды, необходимое/зарезервированное/ожидаемое для питьевых целей, орошения, естественной жизнедеятельности речной экосистемы и испарения.

$$S(t+1, i) = S(t, i) + I(t, i) - R(t, i) - O(t, i), \quad (5)$$

где  $S$  – полезный объем водохранилища;  $I$  – приток воды в водохранилище;  $R$  – резервный объем водохранилища;  $O$  – сброс воды из водохранилища.

Модуль долгосрочной оптимизации запускается периодически. Результаты будут предоставляться пользователям системы через графический интерфейс. Таким образом, опираясь на эти выходные данные, можно ориентироваться при планировании долгосрочных эксплуатационных решений, связанных с ГЭС.

Краткосрочная оптимизация водохранилищ в бассейне проводится для предотвращения негативного воздействия на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС, в том числе паводков, половодья и наводнений в более короткие периоды. С долгосрочной оптимизацией это связано таким образом, что конечные уровни воды в водохранилищах принимаются в качестве входных данных для долгосрочной оптимизации в механизме автоматического принятия решений, так что результаты краткосрочной оптимизации не противоречат результатам долгосрочной оптимизации. Подобно долгосрочной оптимизации, метод оптимизации роя частиц *PSO* используется в качестве алгоритма оптимизации, однако ограничения, связанные с оптимизацией энергопотребления, не используются. Вместо этого в качестве ограничений используются характеристики водосбросов, параметры водопропускных сооружений, уравнения маршрутизации, продолжительность движения воды и пропускная способность нижнего течения. Целевой функцией здесь будет являться величина объема воды в нижнем бьефе водохранилища, рассчитанная по уравнениям (6) и (7), при превышении пропускной способности нижнего бьефа, в противном случае она равна нулю. Функция пригодности генерируется, как описано в уравнении (4).

$$flood(t, i) = \max(0, O(t, i) - O_{cap}(i)). \quad (6)$$

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T flood(t, i)^2, \quad (7)$$



где  $flood$  – объем воды;  $O$  – сброс воды из водохранилища;  $O_{cap}$  – пропускная способность нижнего течения;

### Полученные результаты

В качестве примера полученных результатов в ходе работы разработанной нами программы был выбран бассейн реки Уфа. Этот конкретный бассейн был выбран из-за его широкой сети гидрологических измерений, включая снеговые и дождевые осадки.

Долгосрочные прогнозы речного стока система формирует с суточной и месячной дискретностью один раз в месяц. Результаты выборки предполагаемой моделируемой выбранной ГЭС в отношении точности объема за 15-месячный период будут представлять из себя графики (рис. 2). В качестве примера был выбран тестовый период с января 2020 г. по март 2021 г. (15 месяцев) для долгосрочного прогноза речного стока, и результатов трех предполагаемых ГЭС в системе, представленных в табл. 1.

**Таблица 1**

#### Результаты долгосрочного прогноза трех моделируемых ГЭС

Номер ГЭС	Коэффициент эффективности модели Нэша-Сатклиффа ( $NSE$ )	Точность объема, %
ГЭС 1	0,73	99,97
ГЭС 2	0,47	94,45
ГЭС 3	0,91	97,86

Точность объема для прогнозирования речного стока является решающим показателем эффективности. Другим показателем является коэффициент эффективности модели Нэша-Сатклиффа ( $NSE$ ) [8], который чувствителен к пиковым изменениям. Выборочные долгосрочные прогнозы речного стока показывают, что коэффициент  $NSE$  изменяется между значениями 0,47 и 0,91, что означает мощную пиковую производительность прогнозной модели. Точно так же диапазон точности объема от 85,25 до 99,97 % доказывает надежность долгосрочного прогноза модели.

Краткосрочные прогнозы речного стока формируются каждый день системой путем запуска и генерации прогноза речного стока на 10 дней вперед с почасовым разрешением, с последующим преобразованием в дневное разрешение.

Примерные результаты краткосрочного прогноза стока для предполагаемой моделируемой выбранной ГЭС приведены на рис. 3.

**Таблица 2**

#### Результаты краткосрочного прогноза трех моделируемых ГЭС

Номер ГЭС	Коэффициент эффективности модели Нэша-Сатклиффа ( $NSE$ )	Точность объема, %
ГЭС 1	0,33	98,51
ГЭС 2	0,44	99,26
ГЭС 3	0,66	89,35

Выборочные значения краткосрочных прогнозов речного стока, представленные в табл. 2, показывают, что коэффициент  $NSE$  колеблется между значениями 0,33 и 0,66, что означает хорошую эффективность пикового прогноза. Но при сравнении с долгосрочной моделью можно сделать вывод, что межсуточная изменчивость речного стока для данной модели будет выше, что приводит к более низкому коэффициенту  $NSE$ . С другой стороны, диапазон точности объема от 89,35 % до 99,88 % краткосрочной модели доказывает, что эффективность краткосрочного прогноза модели будет выше в течение всего тестового периода.

После того, как модель генерирует долгосрочные прогнозы речного стока, модель долгосрочной оптимизации использует их и генерирует 15-месячные результаты оптимизации для максимизации энергии с учетом всех предполагаемых ГЭС. Пример графика для одного пробного водохранилища, взятый из выходных данных модуля долгосрочной оптимизации, представлен на рис. 4.

Программа генерирует краткосрочный прогноз речного стока на срок до 10 дней для запуска модели краткосрочной оптимизации и создает оптимальные уровни водохранилища для каждой плотины. Результаты краткосрочной оптимизации до 10 дней вперед (рис. 5) позволяют принять необходимые меры предосторожности для предотвращения негативного воздействия на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС, учитывая также все паводки, половодья и наводнения, чтобы предотвратить или свести к минимуму их возможный ущерб.

Хотя и каскадная структура выбранного бассейна реки усложняет управление всей бассейновой системой, получаемые высокоточные результаты прогноза смогут дать операторам системы уверенность в том, что они будут следовать предлагаемым уровням водохранилища. Таким образом, представленная нами экспертная система прогнозирования и оптимизации дает системному оператору возможность оптимизировать использование и управление водными ресурсами с учетом соответствующих требований бассейна и пользователей.

### **Выводы**

Предлагается масштабируемая и интегрированная система прогнозирования речного стока и оптимизации бассейнов рек Челябинской области. Программа для количественной оценки и анализа доступности водных ресурсов, в том числе и для систем водоснабжения, является первой интегрированной системой, созданной для Челябинской области, с точки зрения оптимизации уровня воды для каскадных ГЭС на основе результатов метеорологических и речных прогнозов с максимизацией энергии и предотвращением негативного воздействия на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС с учетом паводков, половодья и наводнений.

Результаты выборки подтверждают удовлетворительную работу системы программы для количественной оценки и анализа доступности водных ресурсов. В частности, объемная точность модели долгосрочного прогноза превышает 85,25 %. Эта высокая точность может обеспечить достаточно эффективное долгосрочное управление каскадной системой ГЭС с максимальным производством энергии из водных ресурсов. Кроме того, мы надеемся, что заметная эффективность краткосрочных прогнозов речного стока (более 89,35 %)





для бассейнов рек Челябинской области также поможет предотвратить или максимально минимизировать негативное воздействие на речную экосистему в ходе эксплуатации ГЭС с учетом паводков, половодья и наводнений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка имитационной модели работы каскада ГЭС / С. В. Митрофанов, А. Г. Русина, А. Ю. Арестова, А. Е. Калинин. – Текст : электронный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Том 11, № 2 (42). – С. 116–126. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_38501114\\_27417123.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38501114_27417123.pdf).
2. Карапетян, Т. А. Использование искусственных нейронных сетей для оценки и прогнозирования речных стоков / Т. А. Карапетян. – Текст : электронный // Молодой ученый. – 2019. – № 19 (257). – С. 29–33. – URL: <https://moluch.ru/archive/257/58964/> (дата обращения 25.05.2023).
3. Козлов, Д. В. Сопоставление эффективности физико-математических моделей малоизученного бассейна реки (на примере климатического региона Эритреи) / Д. В. Козлов, А. А. Гебрехивот. – Текст : электронный // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 1. – С. 86–112. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44812126\\_28182046.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44812126_28182046.pdf).
4. Борщ, С. В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока / С. В. Борщ, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров. – Текст : электронный // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 1 (375). – С. 176–189. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42771321&ysclid=li44gp7p4g201672908>.
5. Обзор методов эффективного прогнозирования характеристик речного стока в горных и полугорных районах / Е. В. Гайдукова, В. Г. Маргарян, Н. В. Мякишева [и др.]. – Текст : электронный // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 7-4 (77). – С. 324–330. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46469957\\_37460000.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46469957_37460000.pdf).
6. Казакова, Е. М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц / Е. М. Казакова. – Текст : электронный // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2022. – Том 39, № 2. – С. 150–174. – Текст : электронный <https://www.mathnet.ru/links/f9bea0d150e961b65fc5ee6816f3aeae/vkam544.pdf>.
7. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище / С. В. Борщ, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров, Н. М. Юмина. – Текст : электронный // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4 (386). – С. 47–63. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_49857202\\_77012154.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49857202_77012154.pdf).
8. Кирста, Ю. Б. Универсальная имитационная модель для долгосрочного прогноза половодья горных рек / Ю. Б. Кирста, О. В. Ловцкая. – Текст : электронный // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2020. – № 1(56). – С. 34–52. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44085577\\_62713448.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44085577_62713448.pdf).

**KOZHEVNIKOV Egor Evgenevich, postgraduate student of the chair of urban planning, engineering networks and systems; DENISOV Sergey Egorovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of urban planning, engineering networks and systems**

#### FEATURES OF MANAGEMENT AND FORECASTING OF THE RIVER FLOW UNDER REGULATION OF A WATER SOURCE



South Ural State University (national research university)

76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia. Tel.: +7(351) 267-91-44, +7 (905) 837-51-46;

e-mail: kozhevnikov@susu.ru

*Key words:* river runoff forecast, short-term forecast, long-term forecast, particle swarm optimization method.

---

*This paper presents a program we have developed based on a large-scale and scalable system of runoff forecasting and river basin optimization. The optimization results obtained during the operation of this program for cascade HPPs are formed using the particle swarm optimization based on the generated forecasts of river runoff and basin restrictions.*

---

## REFERENCES

1. Mitrofanov S. V., Rusina A. G., Arestova A. Yu., Kalinin A. E. Razrabotka imitatsionnoy modeli raboty kaskada GES [Development of a simulation model for the operation of a HPP cascade] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University]. – 2019. Vol. 11, № 2 (42). – P. 116–126. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_38501114\\_27417123.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38501114_27417123.pdf).
2. Karapetyan T. A. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey dlya otsenki i prognozirovaniya rechnykh stokov [The use of artificial neural networks for assessing and predicting river flows] // Molodoy uchyony [Young Scientist]. – 2019. № 19 (257). – P. 29–33. – URL: <https://moluch.ru/archive/257/58964/> (data obrascheniya 25.05.2023).
3. Kozlov D. V., Gebrekhivot A. A. Sopotavlenie effektivnosti fiziko-matematicheskikh modeley maloizuchennogo basseyna reki (na primere klimaticheskogo regiona Eritrei) [Comparison of the effectiveness of physical and mathematical models of a little-studied river basin (on the example of the climatic region of Eritrea)] // Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water industry of Russia: problems, technologies, management]. – 2021. №1. – P. 86-112. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44812126\\_28182046.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44812126_28182046.pdf).
4. Borsch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V. Effektivnost modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Efficiency of modeling and forecasting river flow] // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]. – 2020. № 1 (375). – P. 176–189. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42771321&ysclid=li44gp7p4g201672908>.
5. Gaydukova E. V., Margaryan V. G., Myakisheva N. V., et al. Obzor metodov effektivnogo prognozirovaniya kharakteristik rechnogo stoka v gornykh i polugornykh rayonakh [Review of methods for effective forecasting river runoff characteristics in mountainous and semi-mountainous regions] // Evraziyskoe Nauchnoe Obединenie [Eurasian Scientific Association]. – 2021. №7-4 (77). – P. 324–330. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46469957\\_37460000.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46469957_37460000.pdf).
6. Kazakova E. M. Kratkiy obzor metodov optimizatsii na osnove roya chastits [A brief review of optimization methods based on a swarm of particles]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki [Vestnik KRAUNC. Physical and mathematical sciences]. – 2022. Vol. 39, № 2. – P. 150–174. – URL: <https://www.mathnet.ru/links/f9bea0d150e961b65fc5ee6816f3aeae/vkam544.pdf>.
7. Borsch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M. Prognozirovanie pritoka vody v Tsimlyanskoe vodokhranilische [Forecasting the inflow of water into the Tsimlyansk reservoir] // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]. – 2022. № 4 (386). – P. 47–63. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_49857202\\_77012154.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49857202_77012154.pdf).



8. Kirsta Yu. B., Lovtskaya O. V. Universalnaya imitatsionnaya model dlya dolgosrochnogo prognoza polovodya gornyx rek [Universal simulation model for long-term forecasting floods in mountain rivers] // Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society]. – 2020. № 1 (56). – P. 34–52. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44085577\\_62713448.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44085577_62713448.pdf).

© **Е. Е. Кожевников, С. Е. Денисов, 2023**

Получено: 30.04.2023 г.