

УДК: 504.058

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ОБРАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВОТКИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (1D-ПОСТАНОВКА)

© 2018 г. А.П. Лепихин^{1,2,3}, А.А. Тиунов^{2,3}, А.А. Возняк^{1,3}

¹ ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

² «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

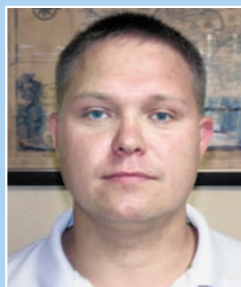
³ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

Ключевые слова: процессы в водохранилищах, обратные течения, гидродинамическое моделирование, одномерная модель, Воткинское водохранилище, Воткинская ГЭС.

Исследованы вопросы формирования обратных течений в Воткинском водохранилище, которое является средним в каскаде Камских водохранилищ. Возникновение обратных течений определяется



А.П. Лепихин



А.А. Тиунов



А.А. Возняк

режимом сброса воды через Камскую ГЭС. Актуальность проблемы обратных течений обусловлена риском попадания загрязненных стоков в водозаборы, расположенные выше по течению относительно выпусков сточных вод.

В верхней части Воткинского водохранилища, которая является нижним бьефом Камского водохранилища, расположен один из крупнейших промышленных узлов – Пермско-Краснокамский – с большим количеством водозаборов и водовыпусков. На основе оценки масштабов обратных течений и последствий для водопользователей устанавливаются водохозяйственные и экологические ограничения режима работы ГЭС, в т. ч. и размеры санитарных попусков. Обратные течения смоделированы в результате численного решения системы уравнений Сен-Венана в 1D-постановке при задании граничных условий первого рода непосредственно у плотины Воткинской ГЭС. Проведена оценка роли морфометрии водохранилища в формировании обратных течений. Выполненные сопоста-

вительные эксперименты на различных схематических моделях Воткинского водохранилища показали, что определяющим фактором формирования обратных течений являются не особенности морфометрии, а отражение от плотины Воткинской ГЭС прямой волны понижения уровней. При уменьшении периода сбросов воды в нижний бьеф область формирования обратных течений смещается в сторону плотины Воткинской ГЭС.

Камское водохранилище пущено в эксплуатацию в 1954 г. после завершения строительства плотины Камской ГЭС. Заполнялось Воткинское водохранилище в 1962–1964 гг. С 1964 г. в верхней части Воткинского водохранилища стало отмечаться появление длинноволновых колебаний уровня воды с формированием обратных течений. Эти процессы мешали нормальной работе Камского речного пароходства, влияли на режим водопользования в связи с попаданием загрязненных стоков в водозаборы, расположенные выше по течению относительно выпусков сточных вод.

Характерной особенностью каскада Камского и Воткинского водохранилищ является то, что подпор от Воткинского гидроузла при нормальном подпорном горизонте (НПГ) распространяется до плотины Камского гидроузла. В нижнем бьефе Камского гидроузла расположен один из крупнейших в стране Пермско-Краснокамский промышленный узел. Особенности гидрологического и гидрохимического режимов Воткинского водохранилища в его пределах затрагивают интересы как большого количества населения, так и десятков крупных промышленных предприятий.

Для исследования длинноволновых колебаний в 1960-х годах были предприняты значительные усилия, в первую очередь, по организации полевых экспедиционных изысканий. В последние годы, в связи с развитием средств и методов вычислительных технологий, важным и эффективным инструментом исследования таких сложных гидрологических процессов становятся вычислительные эксперименты. Они позволяют по-новому осмыслить и объединить результаты ранее проведенных очень трудоемких наблюдений и натуральных экспериментов.

Характер колебательных, длинноволновых процессов в нижних бьефах ГЭС определяется интенсивностью изменения расходов сброса воды, на основе оценки их масштабов и последствий для водопользователей устанавливаются водохозяйственные и экологические ограничения режима работы ГЭС, в т. ч. и размеры так называемых санитарных попусков. Широко обсуждаемая необходимость пересмотра правил эксплуатации ГЭС значительно актуализирует данную проблему.

Исследование обратных течений в водохранилище стимулировал, в первую очередь, прикладной интерес – установление критериев, при ко-

торых они не возникают или не могут оказывать негативного влияния на качество воды в водозаборах. Данное требование обусловлено тем, что при возникновении обратных течений появляются риски забора загрязненных стоков из ниже расположенных водовыпусков сточных вод выше расположенными водозаборами.

Традиционные чисто феноменологические подходы [1–4] к описанию рассматриваемых процессов в настоящее время представляются совершенно недостаточными. Необходимо построение математических моделей этих явлений, воспроизводящих наиболее характерные аспекты. В общем случае данная задача наиболее полно может быть решена на основе гидродинамической модели в 3D-постановке. Однако из-за своей сложности модели в 2D и 3D-постановке требуют для реализации значительные вычислительные ресурсы. С другой стороны, основные принципиальные особенности характера и генезиса обратных течений воспроизводятся и в рамках модели в 1D-постановке, что продемонстрировано по результатам данной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование обратных течений в Воткинском водохранилище

В водохранилищах при резких изменениях расходов сброса вследствие инерционности водных масс могут возникать длинноволновые колебания с длиной волны несколько десятков и даже сотен километров и с периодом колебаний до десятков часов. Длинноволновые колебания особенно заметны и способны оказывать значимое влияние на характер водопользования в находящихся в подпоре нижних бьефах крупных гидроузлов. Вследствие этих процессов могут формироваться такие специфические явления, как обратные течения. На реках они не наблюдаются, т. к. для их возникновения необходимо не только резкое изменение расхода сброса воды, но и наличие подпора.

С одной стороны, длинные волны могут оказывать значимое влияние на надежность объектов гидроэнергетики [5], поддержание гарантированных глубин, а, соответственно, и обеспечения судоходства [2], с другой, – обратные течения могут существенно влиять на обеспечение надежности работы поверхностных водозаборов. Поэтому наблюдению за ними, анализу причин их возникновения посвящено большое количество публикаций: Н.В. Буторина [1] на Угличском и Рыбинском водохранилищах, А.М. Литвинова [6] на Рыбинском водохранилище, Н.С. Ярославцева, Е.А. Шмелева на Горьковском [7], П.Ф. Чигиринского, А.Н. Коняева на Куйбышевском водохранилище [8], П.Ф. Чигиринского и А.В. Рахубы на Саратовском водохранилище [9–11].

Как уже отмечалось, подпор Воткинской ГЭС распространяется при НПП непосредственно до нижнего бьефа Камской ГЭС. Так как работа ГЭС харак-

теризуется существенным изменением как внутрисуточной, так и недельной нагрузок, а, соответственно, и изменением расходов сбросов через плотину Камской ГЭС, сложились условия возникновения обратных течений. Результаты наблюдения и описание этих явлений на Камских водохранилищах отражены в различных публикациях: И.К. Мацкевич, Ю.М. Матарзин [12], Ю.М. Матарзин, Б.Б. Богословский [4], И.К. Мацкевич [13], В.М. Матвеев, Э.А. Снигирев, В.Ф. Петров и др. [14]. Наиболее детальное исследование с целью изучения и оценки возможных последствий резкого снижения расходов сброса воды через плотину Камской ГЭС на гидравлический режим нижнего бьефа Камской ГЭС и в целом Воткинского водохранилища в 1966 г. было проведено на основе серии натуральных экспериментов по инициативе Пермэнерго с практически полным прекращением сброса воды с электростанции. В проведении комплекса гидрометрических наблюдений принимали участие сотрудники Пермской ГМС. В ходе этих экспериментов осуществлялось резкое снижение расхода сброса с 1200 м³/с через плотину Камской ГЭС практически до нуля, прекращение сброса продолжалось до ~ 30 ч. Параллельно проводилось измерение уровня воды и скорости течения на нескольких створах. Результаты натуральных экспериментов впервые были опубликованы И.А. Кармазиным, Б.З. Вильниц [15], затем неоднократно дублировались различными авторами [3, 4, 12–14]. В общем виде результаты натуральных экспериментов представлены в табл. 1, 2.

Данные этих экспериментов, в первую очередь, стали основой для разработки гидродинамической модели обратных течений Воткинского водохранилища. Обратные течения как элемент динамики длинных волн, как уже отмечалось, обуславливаются инерционностью динамики рассматриваемых водных объектов. Феноменология длинных волн в нижних бьефах гидроузлов и обратных течений подробно дана в [3, 4].

Принципиальное отличие колебаний, образующихся при резких изменениях расходов сбросов в нижний бьеф ГЭС, от сейшевых колебаний заключается в том, что образующиеся при их возникновении волны являются не стоящими, а распространяющимися со скоростью Лагранжа $V \sim (H^*g)^{1/2}$. При характерной глубине водохранилища (при НПГ на участке Камская ГЭС–Краснокамск $H \sim 6$ м) имеем $V_{\text{вол}} \sim 7,7$ м/с, что весьма близко к экспериментальной оценке скорости перемещения как прямой 7,6 м/с, так и обратной волны $V \sim 6,9$ м/с [13].

Очевидно, что их характер должен определяться сочетанием параметров сбросов через плотины Камской и Воткинской ГЭС с морфометрическими особенностями водохранилища. При этом существенно важно установление самого механизма образования обратных течений. В работе [2] обратные течения рассматривались как элементы сейшевых колебаний.

Таблица 1. Скорость обратного течения в нижнем бьефе Камской ГЭС, 1966 г.

| Место наблюдения | Расстояние от плотины КамГЭС, км | Дата и время наблюдения | Расход КамГЭС, м ³ /с | Горизонт наблюдений, м | Скорость течения, см/с |
|------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| г. Краснокамск | 57 | 7.08 11 ч 05 мин | 24 | 2,5 | 4,5 |
| г. Краснокамск | 57 | 7.08 11 ч 32 мин | 24 | 2,5 | 2,6 |
| мкр Закамск | 30 | 24.07 10 ч 30 мин | 0 | 1,0 2,5 5,8 | 10,0 16,0 13,0 |
| мкр Закамск | 30 | 24.07 12 ч 00 мин | 0 | 5,8 | 15,0 |
| мкр Закамск | 30 | 31.07 10 ч 25 мин | 0 | 5,8 | 11,0 |
| мкр Закамск | 30 | 31.07 12 ч 10 мин | 0 | 2,5 | 7,0 |
| мкр Закамск | 30 | 31.07 13 ч 45 мин | 0 | 5,8 | 8,0 |
| мкр Закамск | 30 | 31.07. 14 ч. 30 мин | 0 | 1,0 2,5 | 5,0 6,0 |
| мкр Закамск | 30 | 1.08. 6 ч 00 мин | 0 | 1,0 2,5 | 4,0 4,0 |

Таблица 2. Результаты наблюдений за направлением и скоростью течения р. Камы в районе г. Краснокамска 7 августа 1966 г.

| № серии наблюдений | Время | | Продолжительность, мин | Расстояние от шеста до берега, м | Направление движения шеста | Скорость течения, м/с |
|--------------------|--------|-------|------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | начало | конец | | | | |
| 1 | 11–05 | 11–20 | 22 | 50 | вверх | 0,045 |
| 2 | 11–32 | 12–00 | 28 | 30 | вверх | 0,026 |
| 3 | 12–07 | 12–35 | 28 | 70 | стоит на месте | – |
| 4 | 12–45 | 12–55 | 10 | 30 | стоит на месте | – |
| 5 | 13–00 | 13–30 | 30 | 40 | стоит на месте | – |
| 6 | 13–35 | 13–50 | 15 | 50 | стоит на месте | – |

При этом предполагалось, что при резком прекращении сброса через плотину Камской ГЭС возникают одноузловые сейшевые колебания с расположением узла в районе г. Осы. В работе [3, 4] отмечается, что распространяющаяся от Камской ГЭС волна понижения уровня отражается от большого объема воды в районе п. Осы и возникает обратная волна повышения. Данное отражение и является причиной формирования обратных течений. Вы-

полненные исследования показали, что вопрос о механизмах отраженных волн, роли в их формировании морфометрических особенностей водного объекта значительно более сложный.

В настоящее время для решения актуальных задач речной гидравлики чисто феноменологический подход представляется совершенно недостаточным. Необходимо построение математической модели и воспроизведение на ее основе наиболее характерных аспектов этого явления. Таким эффективным инструментом является моделирование движения попусков на основе системы уравнений Сен-Венана. Как следует из анализа данной системы уравнений, максимальная скорость перемещения длинных волн не может превышать $V_{\text{вот}} \sim (W/Bg)^{1/2}$ (скорость Лагранжа), $W/B \sim H$, где W , B , H – площадь поперечного сечения, ширина и характерная глубина водохранилища соответственно. Как отмечено выше, она достаточно хорошо согласуется с исходными данными.

Система уравнений Сен-Венана, описывающая нестационарные, неустановившиеся потоки в каналах, не имеет в общем виде аналитических решений. Весьма упрощенные постановки, для которых удавалось найти аналитические решения, зачастую не отвечали потребностям практики. В связи с этим до конца 1950-х годов при решении подобных задач основное внимание уделялось постановке и проведению натурных и лабораторных экспериментов [16–18]. Если проведение натурных экспериментов весьма трудоемко, то при постановке лабораторных экспериментов достаточно сложно соблюсти как геометрическое, так и динамическое подобие. Поэтому с начала 1960-х годов, когда стали доступны ЭВМ, основное внимание стало уделяться освоению вычислительных технологий при решении данных задач. В нашей стране начало развития этого направления связывается с работами О.Ф. Васильева [19], М.С. Грушевского [20–22], Б.С. Историка [23], Г.П. Калинина, А.С. Кучмента [24, 25].

Система уравнений Сен-Венана для своего однозначного решения требует, кроме задания начальных условий, также граничные условия. При решении задачи распространения длинных волн в нижних бьефах ГЭС М.С. Грушевским [20–22] рассматривались два различных типа граничных условий. Граничные условия первого рода характерны для отражения от твердой стенки, когда на нижней границе задается $Q(x)|_{x=L} = \Psi(t)$, в частном случае – непроницаемые стены $Q(x)|_{x=L} = 0$ (1).

При отражении волны от водного объекта с постоянным уровнем, что характерно при впадении канала в нижнем бьефе в водоем очень большого объема, имеем $\left. \frac{\partial Z(x)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$ (2). Если с постановкой граничного условия

первого типа все достаточно ясно, в качестве нижней границы принимается плотина Воткинской ГЭС, расположенная на расстоянии $L = 333$ км от плотины Камской ГЭС, в качестве $\Psi(t)$ – изменения расхода сброса через плотину, то ситуация с реализацией граничного условия второго рода значительно более неопределенна. Так как Воткинское водохранилище характеризуется достаточно плавным увеличением площади поперечного сечения, не определено место, где должны задаваться граничные условия второго рода. В работах И.К. Мацкевича [12, 13], Ю.М. Матарзина [3, 4], А.М. Казакова [2] отмечено, что такая граница должна находиться в районе г. Осы, на расстоянии ~ 200 – 250 км ниже по течению от Камской ГЭС. При этом принимается сейшевая природа колебаний, а узел находится на расстоянии 266 км от электростанции. Каких-либо серьезных аргументаций по данной позиции не было приведено. Так как природа рассматриваемых колебаний носит, как уже отмечалось, существенно не сейшевый характер, ставится под сомнение сама постановка граничных условий второго рода.

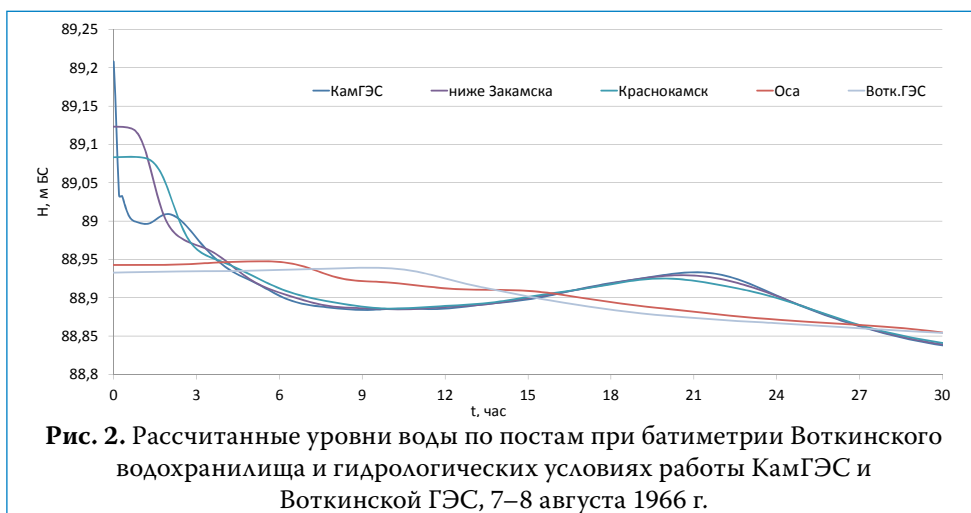
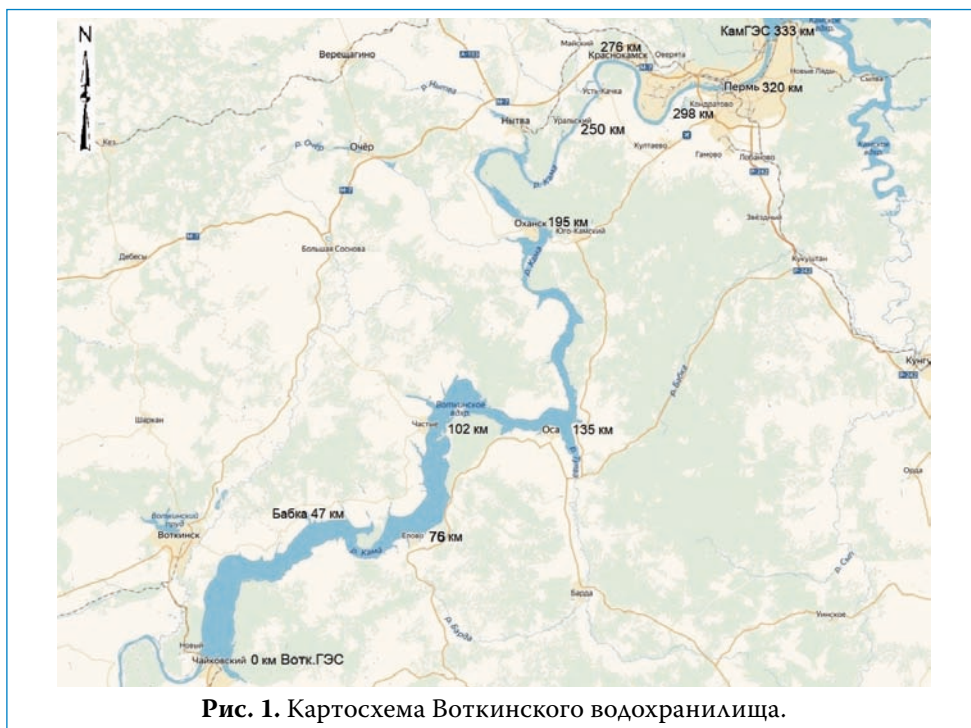
Для решения рассматриваемой задачи в одномерной постановке для построения модели использовали лицензионный программный продукт NEC-RAS v.4.1, который позволяет весьма эффективно численно решать систему уравнений Сен-Венана в 1D-постановке [26]. Данный программный продукт успешно применен при решении широкого круга водохозяйственных задач, в частности [27, 28].

Рассматриваемая расчетная область представлена на рис. 1.

Оценка эффективных коэффициентов гидравлической шероховатости для расчетной области Воткинского водохранилища проведена на основе калибровки гидравлической модели в 1D-постановке по результатам материалов регулярных гидрометрических наблюдений при поддержании НПГ ~ 89 м на Воткинском водохранилище и расходов сброса через плотину Камской ГЭС в диапазоне 300 – 1500 м³/с. В данном диапазоне доминирующий вклад в формирование эффективной шероховатости вносит зернистая компонента, что существенно упрощает процесс калибровки модели. В качестве основного сценария изменения расходов сбросов через плотины Камской и Воткинской ГЭС были приняты гидрологические характеристики, соответствующие проведению натурного эксперимента 7–8 августа 1966 г. Результаты данных расчетов представлены на рис. 2.

Для решения принципиального вопроса о роли морфометрических особенностей водохранилища в формировании обратных течений проводили параллельные вычислительные эксперименты в 1D-постановке модели с реальной морфометрией и схематизированными моделями. Первая схематизированная модель имела представление прямолинейного прямоугольника: р. Кама шириной 1 км и глубиной 7 м протяженностью от Камской до Воткинской ГЭС представлена на рис. 3 а. Вторая схематизированная

модель имела более сложную форму: до г. Оса она, как и первая схематизированная модель, имеет канал шириной 1 км, затем до с. Елово канал шириной 5 км и далее до плотины Воткинской ГЭС канал шириной 10 км при постоянной глубине 7 м на всем участке модели, рис. 3 б.



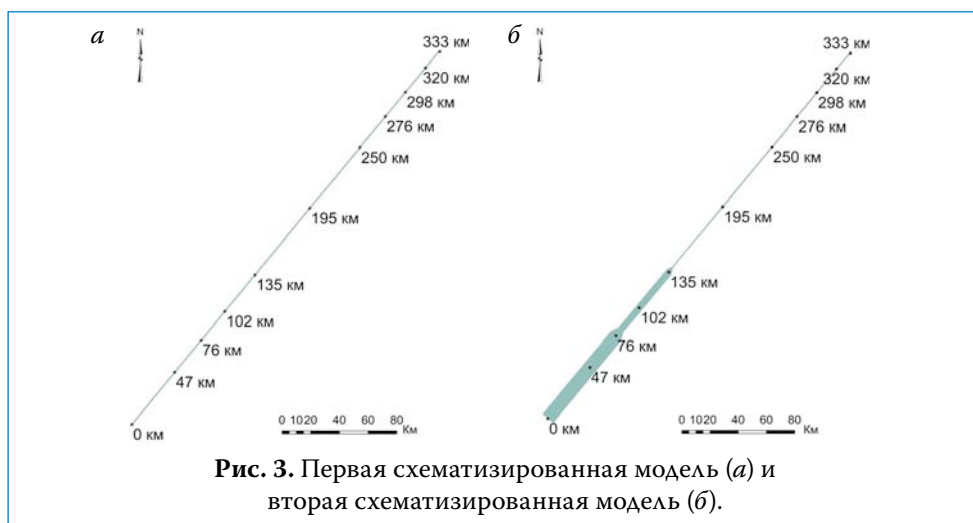


Рис. 3. Первая схематизированная модель (а) и вторая схематизированная модель (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из представленных на рис. 4 результатов расчетов, используемая модель в 1D-приближении построена на основе численного решения системы уравнения с граничным условием (1) на естественной, нижней границе, непосредственно у плотины Воткинской ГЭС. Согласно результатам, через 12–16 ч после прекращения сброса через плотину Камской ГЭС формируется поток воды с расходом $\sim 200 \text{ м}^3/\text{с}$ в сторону Камской ГЭС, возникают обратные течения с характерными скоростями $\sim 4 \text{ см}/\text{с}$. При этом через неделю, 14–15 августа 1966 г., когда расход сброса через плотину Камской ГЭС снижался до $200 \text{ м}^3/\text{с}$, обратные течения не возникали.

Принципиальное значение имеет оценка роли морфометрии водохранилища, в частности, существенного расширения Воткинского водохранилища ниже г. Осы в формировании обратных течений. Для решения этого вопроса были проведены параллельные расчеты по первой и второй схематизированным моделям.

Результаты сопоставительных численных экспериментов в 1D-постановке представлены на рис. 4, 5. Как отражено на рис. 5, схематизированная модель № 1 при прочих равных условиях не воспроизводит образования обратных волн. Казалось бы, можно говорить о решающей роли морфометрии в образовании обратных волн. Однако, если отключить сброс воды из водохранилища в размере $Q \sim 1200 \text{ м}^3/\text{с}$, то обратные волны начинают хорошо воспроизводиться (рис. 6). Данное обстоятельство имеет свое объяснение. В случае схематизированной модели № 1 в силу значительно меньшего объема ее нижней части, она значительно более чувствительна к сбросу воды из водохранилища. Сброс воды из водохранилища приводит

к существенному увеличению уклона свободной поверхности, что и блокирует образование обратных течений. Данный вывод хорошо подтверждается вычислительными экспериментами, проведенными с моделью № 2. Их результаты представлены на рис. 7, 8.

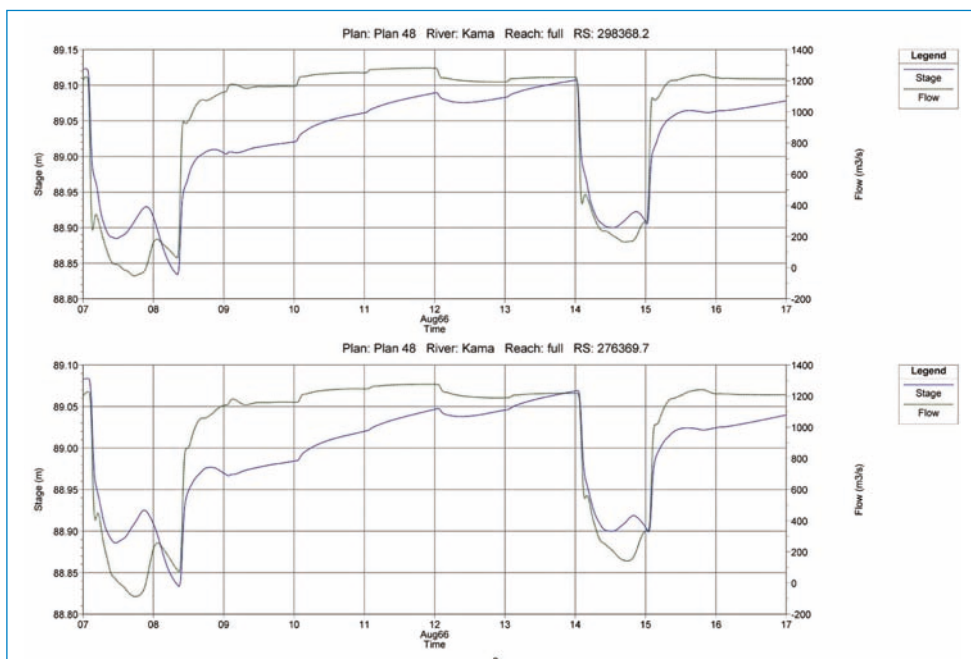


Рис. 4. Расчетные характеристики динамики уровня режима и расходов воды в Воткинском водохранилище при прекращении сброса воды через плотину Камской ГЭС на 30 ч, по створам Закамск (298 км) и Краснокамск (276 км).

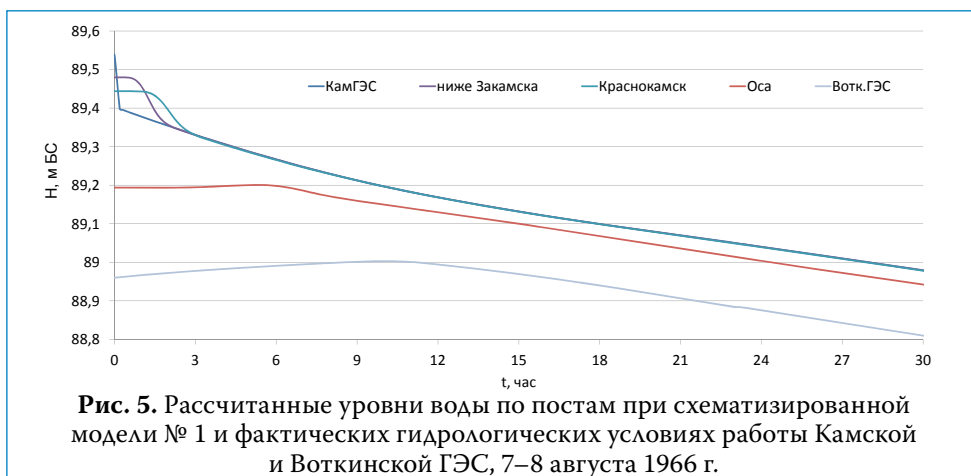


Рис. 5. Рассчитанные уровни воды по постам при схематизированной модели № 1 и фактических гидрологических условиях работы Камской и Воткинской ГЭС, 7–8 августа 1966 г.

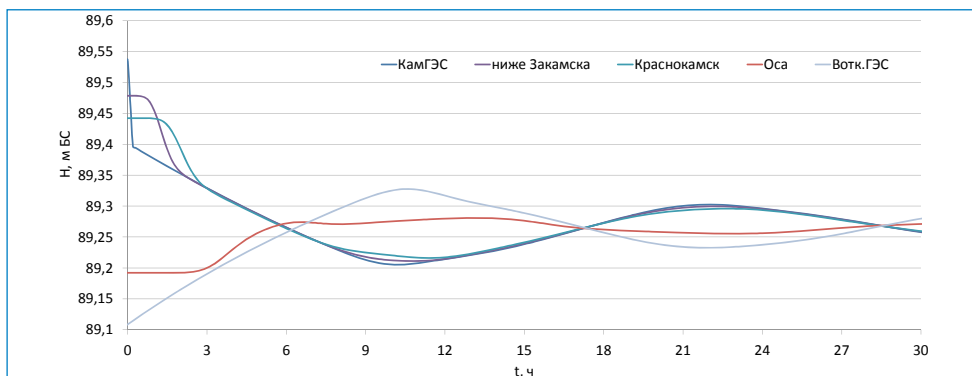


Рис. 6. Рассчитанные уровни воды по постам при схематизированной модели № 1 и реальных гидрологических условиях работы Камской ГЭС за 7–8 августа 1966 г. при нулевом расходе сброса с Воткинской ГЭС.

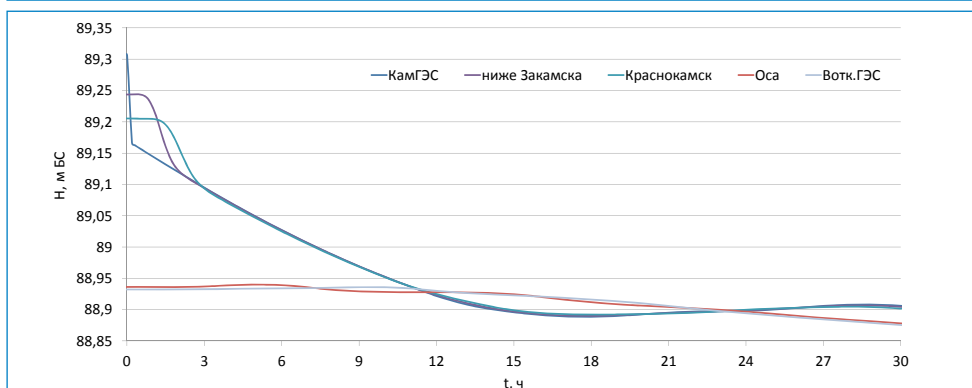


Рис. 7. Рассчитанные уровни воды по постам при схематизированной модели № 2 и реальных гидрологических условиях работы Камской и Воткинской ГЭС, 7–8 августа 1966 г.

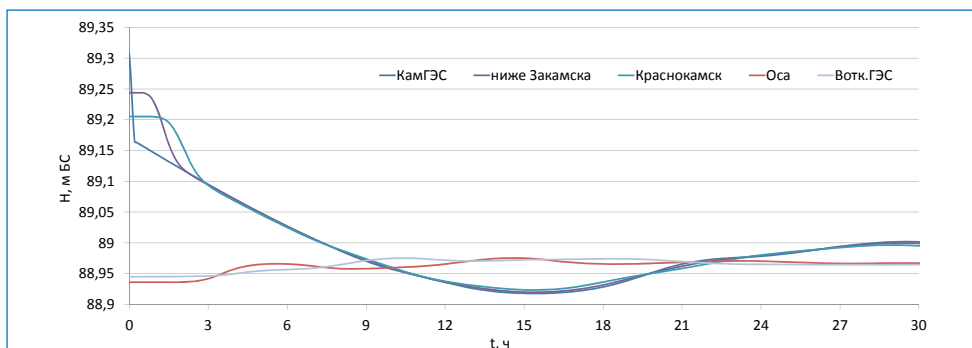


Рис. 8. Рассчитанные уровни воды по постам при схематизированной модели № 2 и реальных гидрологических условиях работы Камской ГЭС за 7–8 августа 1966 г. при нулевом расходе сброса с Воткинской ГЭС.

Существенный практический интерес представляет оценка условий формирования обратных течений, если сброс воды через плотины Камской ГЭС будет прекращен не на 30 ч, как это было при проведении натуральных экспериментов 7–8 августа 1966 г., а на меньший период. Разработанная модель позволяет проводить такие оценки на основе соответствующих экспериментов. На рис. 9–11 представлены результаты вычислительных экспериментов с прекращением сброса через плотину Камской ГЭС на 8 ч.

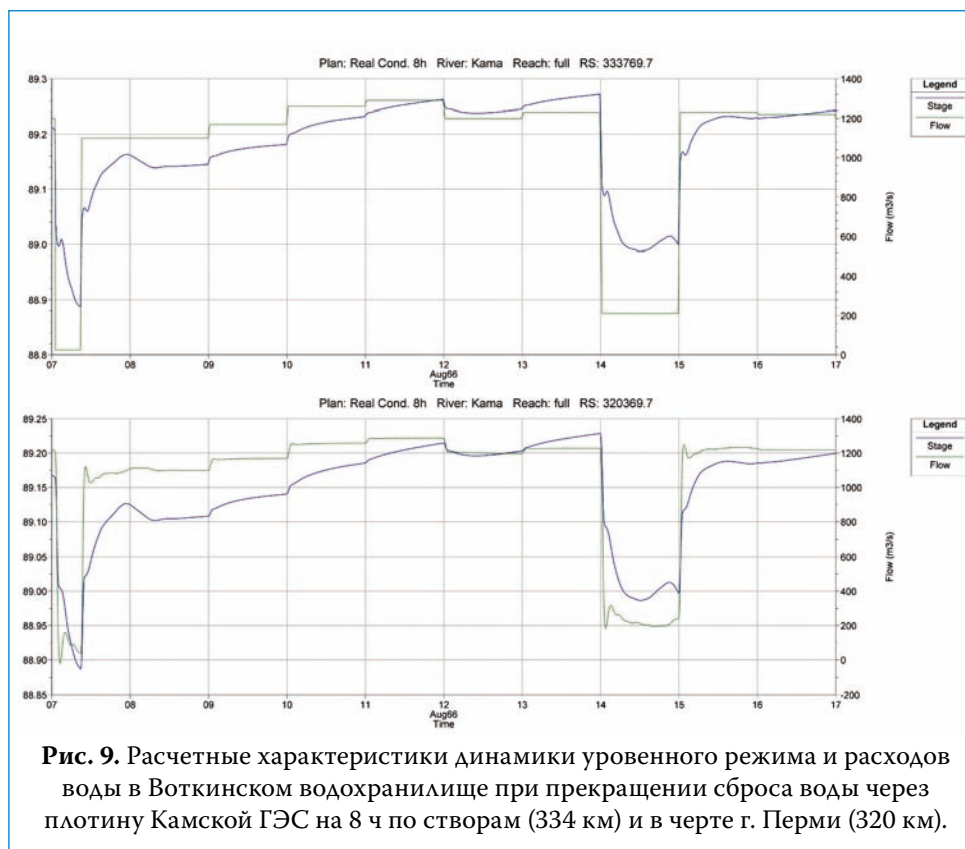
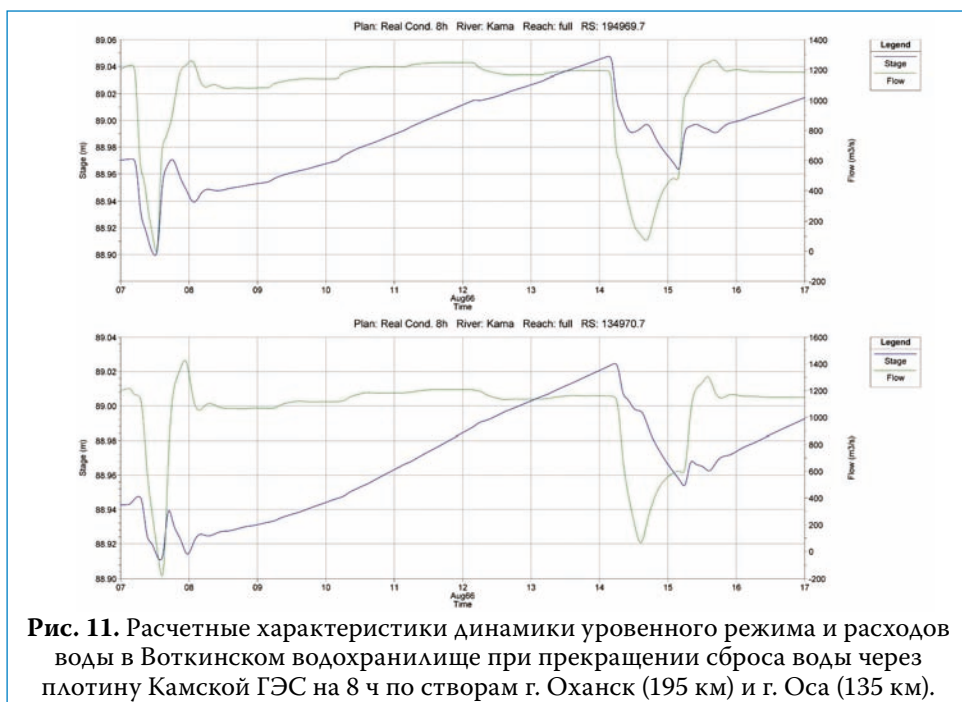
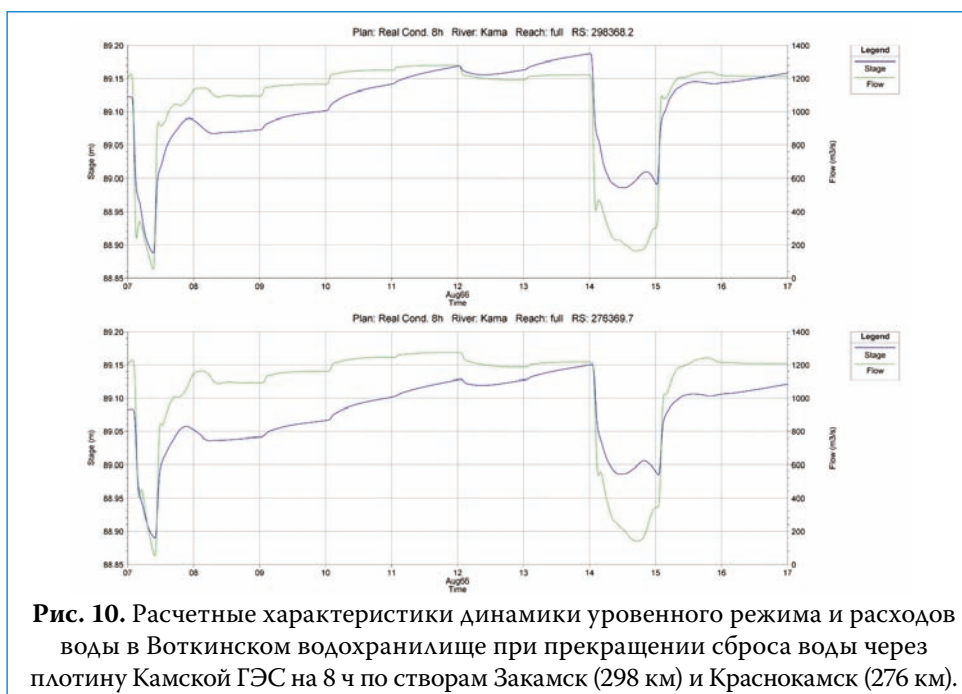


Рис. 9. Расчетные характеристики динамики уровня режима и расходов воды в Воткинском водохранилище при прекращении сброса воды через плотину Камской ГЭС на 8 ч по створам (334 км) и в черте г. Перми (320 км).

Как следует из сопоставления рис. 9–11 и рис. 4, 6, при снижении времени прекращения сброса через плотину Камской ГЭС с 30 ч до 8 ч, формирование обратных течений смещается в нижнюю часть водохранилища в район г. Осы. Данное смещение обусловлено взаимодействием прямых и обратных волн, возникающих в Воткинском водохранилище при прекращении сброса через плотину Камской ГЭС.



ВЫВОДЫ

Выполнено исследование особенностей образования обратных течений на основе численного решения системы уравнений Сен-Венана в 1D-постановке при задании граничных условий первого рода непосредственно у плотины Воткинской ГЭС. На основе выполненных вычислительных экспериментов рассмотрены и объяснены механизмы формирования и динамики обратных течений в водохранилищах.

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что прямая волна спада уровней распространяется до плотины Воткинской ГЭС и, отражаясь от нее и устремляясь в обратном направлении, обуславливает наблюдаемый подъем уровня воды на водомерных постах вплоть до плотины Камской ГЭС. Выполненные сопоставительные эксперименты на различных схематических моделях Воткинского водохранилища продемонстрировали, что определяющим фактором формирования обратных течений являются не особенности морфометрии, а отражение от плотины Воткинской ГЭС прямой волны понижения уровней. При этом уменьшение периода прекращения сброса воды через плотину приводит к смещению зоны обратных течений в сторону плотины Воткинской ГЭС. Полученные результаты имеют принципиальное значение для корректного, объективного установления минимальных санитарных попусков для надежного обеспечения работы водозаборов, находящихся одновременно в нижнем бьефе вышерасположенной ГЭС и в подпоре от нижерасположенной ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буторин Н.В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
2. *Казаков А.М.* Определение проектного уровня на судоходных реках в зоне неустановившегося режима нижних бьефов ГЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИЭЭВТ, 1966. 158 с.
3. *Матарзин Ю.М.* Гидрология водохранилищ. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2003. 295 с.
4. *Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К.* Гидрологические процессы в верхних и нижних бьефах гидроузлов. Пермь: Пермский гос. ун-т, 1978. 91 с.
5. *Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* О распластывании волны высоких вод при движении по призматическому руслу // Проблемы регулирования речного стока: сб., М.: Изд. АН СССР, 1956. Вып. 6.
6. *Литвинов А.С.* О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС. Инф. бюлл. Ин-та биол. внутренних вод АН СССР, 1968. №2. С. 26–30.
7. *Ярославцев Н.А., Шмелева Е.А.* Режим течений Горьковского водохранилища // сб. работ Горьковской и Волжской ГМО. 1967. Вып. 4. С. 28–44.
8. *Чигиринский П.Ф., Коняев А.Н.* О расчете вынужденных колебаний уровня воды Куйбышевского водохранилища, вызываемых изменением нагрузок ГЭС // Труды ГГИ. 1964. Вып. 113.

9. Чигиринский П.Ф. Динамика водной поверхности Саратовского водохранилища // сб. работ Тольяттинского ГМО. Л.: Гидрометеиздат, 1979. Вып.11. С. 53–62.
10. Рахуба А.В. Длинноволновая динамика и ее влияние на формирование качества воды водохранилищ суточного регулирования. Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2011. Т. 13. № 5. С. 196–203.
11. Рахуба А.В. Моделирование динамики примеси в нижнем бьефе водохранилища при экстремальных попусках ГЭС // Водное хозяйство России. 2010. № 4. С. 28–41.
12. Мацкевич И.К., Матарзин Ю.М. Водохранилище Воткинской ГЭС на р. Каме. Пермь: Изд. Перм. ун-та. 1968. 203 с.
13. Мацкевич И.К. О волновых колебаниях уровня воды и скорости течения в нижнем бьефе Камской ГЭС // Гидрология и метеорология. Уч. зап. Пермского ун-та. Вып. V. № 246. Пермь, 1970. С. 48–61.
14. Матвеев В.М., Снигирев Э.А., Петров В.Ф. Методика определения величины постоянного санитарного пускa в подпертые нижние бьефы гидроузлов // Материалы конф. по санитарной охране водоемов от выбранных сточных вод анилинокрасочных предприятий. Пермь: ОС НТО, 1970.
15. Кармазин И.А., Вильниц Б.З. Неустановившийся уровненный режим Воткинского водохранилища при недельном регулировании стока Камской ГЭС // Сб. материалов по обмену опытом эксплуатации энергетических установок. Пермь, 1966. С. 46–54.
16. Виноградова Е.А., Кононкова Г.Е. Экспериментальное исследование трансформации попусковых волн на модели водохранилищ речного типа. Метеорология и гидрология, 1965. № 10. С. 46–49.
17. Федоров Н.Н. Влияние неустановившегося движения воды на распределение осредненных скоростей по вертикали // Труды ГГИ, 1965. Вып. 121. С. 52–63; 1967. Вып. 140. С. 136–139.
18. Федоров Г.Ф. Изучение кинематики волны пускa // Труды ЦНИИЭВТ, 1969. Вып. 19. С. 83–95.
19. Васильев О.Ф. и др. Численный метод расчета распространения длинных волн в открытых руслах и приложение его к задаче о паводке // Доклады АН СССР, 1963. Т. 151. № 3. С. 525–527.
20. Грушевский М.С. Использование электронных цифровых машин для расчета неустановившегося движения воды в призматических руслах // Труды ГГИ. Вып. 94. 1962.
21. Грушевский М.С. О свободных колебаниях воды в мелководном бассейне // Труды ГГИ. Вып. 28 (82). 1951.
22. Грушевский М.С. Распространение длинной волны в прямоугольном канале с горизонтальным и наклонным дном // Труды ГГИ. Вып. 40 (94). 1953.
23. Историк Б.Л. Расчет неустановившегося движения воды в открытых водотоках на электронных вычислительных машинах // Труды Гидропроекта, 1964. Вып. 12. С. 222–239.

24. Калинин Г.П., Кучмент Л.С. О численных методах решения уравнения Сен-Венана для расчета неустановившегося движения воды в реках // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 3–9.
25. Кучмент Л.С. Расчеты неустановившегося движения воды в нижних бьефах ГЭС // Комплексное использование водных ресурсов к режиму Волжско-Камского каскада гидроэлектростанции. М.: Энергия, 1965, 1967.
26. HEC-RAS_ReferenceManual, 2002.
27. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 16–32.
28. Перепелица Д.И., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 34–48.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; профессор, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: lepihin49@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ведущий инженер-программист, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Возняк Анна Анатольевна, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; доцент, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: aavoznyak@gmail.com