

МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО УЧЕТА СТОКА В УСЛОВИЯХ ЗАРАСТАНИЯ РУСЛА (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ МАТЫРА В СТВОРЕ СЕЛА КРУТОЕ)

© 2017 г. Ю.В. Шарина

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: оперативный учет стока рек, р. Матыра, гидрологический пост, расход воды, уровень воды, кривая расходов воды, зарастание русла.

Рассмотрена усовершенствованная методика оперативного учета стока рек в условиях зарастания русла. Представлены результаты анализа данных наблюдений за водным режимом р. Матыра в створе с. Крутое за период с 1994 по 2013 гг. Проанализированы особенности изменения характеристик гидрологического режима под влиянием метеорологических факторов в периоды зарастания русла. В предлагаемых решениях для оперативного учета стока использована опорная многолетняя зависимость расходов от уровней воды, которая уточняется по данным последних измерений расходов воды посредством введения поправок, характеризующих изменения пропускной способности русла расчетного года. Эти изменения рассчитываются методом оптимальной экстраполяции рядов относительных отклонений расходов воды, измеренных в расчетном году, от многолетней кривой расходов. Для расчета весовых коэффициентов в формулах оптимальной экстраполяции выполнена оценка статистических характеристик рядов относительных отклонений измеренных расходов от многолетней кривой расходов: автокорреляционная функция, дисперсия и математическое ожидание.

Оценка эффективности предложенной методики выполнена на основе сравнения данных оперативного и режимного учета стока за период с 2008 по 2013 гг. Средние квадратические расхождения с данными режимного учета стока составили 5–10%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточной надежности данных оперативного учета стока, полученных с использованием разработанной методики и рекомендовать ее для оперативного учета стока малых и средних значительно зарастающих рек.



Ю.В. Шарина

Специалисты Государственного гидрологического института (ГГИ) на протяжении десятилетий разрабатывают методики режимного и оперативного учета стока рек, многие из которых [1–3] внедряются в Росгидромете. Однако следует отметить, что в действующих нормативных и методи-

ческих документах до настоящего времени не нашел должного отражения тот факт, что в гидрологии практикуется два варианта учета стока:

- режимный, при котором средние суточные расходы воды вычисляются по истечении расчетного периода и после тщательного всестороннего анализа помещаются в таблицах справочных изданий водного кадастра;
- оперативный, сводящийся к вычислению текущих значений расходов воды для обеспечения задач прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений, а также ежедневного контроля водности рек и информационного обеспечения функционирования объектов водного хозяйства в речных бассейнах.

Одной из наиболее сложных задач является гидрометрический учет стока в оперативном режиме, т. е. получение значений расходов воды по данным об измеренных значениях уровней и расходов воды практически в режиме реального времени. При этом наибольшие затруднения возникают, когда такие расчеты необходимо выполнять в условиях изменяющихся характеристик пропускной способности русла, нарушающих однозначность зависимости расходов от уровней воды.

В варианте оперативного учета стока оценка характеристик пропускной способности русла выполняется по данным состоявшихся к моменту расчета измерений расходов воды. В интервале от состоявшегося в расчетном году до следующего измерения расхода воды возникает необходимость выполнять экстраполяцию этих характеристик. В варианте режимного учета стока при расчете расходов воды используются методы интерполяции характеристик изменения пропускной способности русла, поэтому погрешности режимного учета стока всегда существенно меньше, чем оперативного. На практике из-за отсутствия регламентированных методик погрешности оперативного учета стока часто достигают 30 и более процентов.

В данной статье рассмотрена усовершенствованная методика оперативного учета стока в период зарастания русла. В предложенной методике расчета оперативных расходов воды за основу принимается многолетняя кривая расходов (МКР) и средние многолетние характеристики изменения пропускной способности русла в период зарастания в расчетном створе. Их уточнение в процессе расчетов выполняется по данным текущих измерений расходов воды с учетом фазы развития водной растительности. Изложенные в статье методические подходы могут быть рекомендованы к использованию при разработке методик оперативного учета стока в других гидрометрических створах в условиях зарастания русел.

Зарастание русла – довольно распространенное явление для малых и средних рек в районах умеренного климата. В период зарастания рост водной растительности в большей или меньшей степени приводит к увеличению

гидравлических сопротивлений на участке поста, вследствие чего однозначная связь между расходом и уровнем нарушается. Наблюдения за состоянием русла ведутся на всех гидрологических постах, появление первых признаков зарастания фиксируется в книге наблюдений КГ-1М и кодируется с указанием степени зарастания русла в баллах от 0,1 до 1. Если пост информационный, сведения о зарастании кодируются также в коде КН-15 и передаются в центр сбора и оперативной обработки гидрологических данных.

Пропускная способность русла под влиянием водной растительности существенно снижается. Характерным признаком уменьшения пропускной способности русла при зарастании является отклонение точек измеренных расходов и средних скоростей течения влево от соответствующих кривых расходов и скоростей свободного русла при сохранении однозначной связи между площадью водного сечения и уровнем (рис. 1).

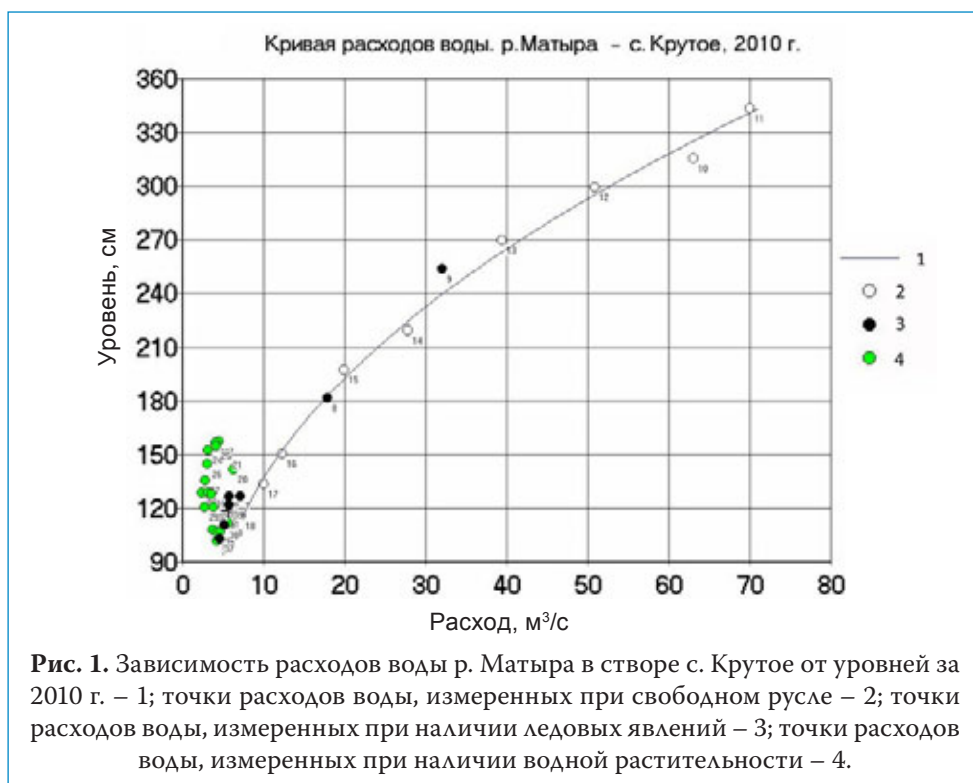


Рис. 1. Зависимость расходов воды р. Матыра в створе с. Крутое от уровней за 2010 г. – 1; точки расходов воды, измеренных при свободном русле – 2; точки расходов воды, измеренных при наличии ледовых явлений – 3; точки расходов воды, измеренных при наличии водной растительности – 4.

Сезон зарастания (вегетации водной растительности) можно разделить на три периода:

– период роста водной растительности, в течение которого ее влияние на связь между расходом и уровнем постепенно увеличивается;

– период относительно стабильного состояния (обычно наиболее продолжительный);

– период отмирания водной растительности, в течение которого ее влияние на связь между расходом и уровнем уменьшается.

Начало и конец вегетации водной растительности зависят в основном от хода температур воды и воздуха. Как правило, начало вегетации приходится на конец спада весеннего половодья или начало летней межени. Развитие водной растительности в той мере, в какой она начинает оказывать влияние на связь между расходом и уровнем, идет при стабильном повышении температуры воды до 8–10 °С. Полное отмирание водной растительности обычно происходит при появлении ледяных образований, в ряде случаев завершается даже в условиях ледового режима. Типичными для зарастающих рек в сезон вегетации являются незначительные колебания расхода, нарушаемые отдельными дождевыми паводками или попусками воды [4].

Традиционным методом учета стока в условиях зарастающего русла до последнего времени остается применение переходного коэффициента $K_{\text{зар}} = Q_{\text{зар}}/Q_0$, где $Q_{\text{зар}}$ и Q_0 – расходы воды, соответствующие зарастающему и свободному руслу при определенном уровне воды [4]. Коэффициенту $K_{\text{зар}}$ приписывается роль основной характеристики пропускной способности русла, причем считается, что она снижается при зарастании ($K_{\text{зар}} < 1$). Это условие и предопределяет положение кривой $Q_0(H)$ правее точек измеренных при зарастании расходов воды. На самом деле положение кривой $Q_0(H)$ в этой зоне всегда остается неопределенным, т. к. именно при зарастании русла оно не бывает свободным. Кривую $Q_0(H)$ в зоне низких уровней, при которых и наблюдается развитие водной растительности, строят, экстраполируя полученную до начала зарастания верхнюю ее ветвь, и она может не отражать истинных характеристик пропускной способности свободного русла. Таким образом, $K_{\text{зар}}$ является во многом иллюзорной характеристикой, ведущей к заблуждениям относительно реальных условий движения потока в зарастающем русле.

В лаборатории гидрометрии ГГИ в 1980–1990 гг. были разработаны более совершенные модели учета стока в условиях зарастающего русла. Первая из них регрессионно-гидравлическая [5], в основу которой положено уравнение множественной линейной регрессии. Модель учета включает семь комбинированных переменных с такими определяющими факторами как сумма среднесуточных температур воды Σt и время от начала вегетации водных растений, совпадающее с днем, когда температура воды становится выше 8 °С. Большое количество переменных в этой модели снижает возможности ее применения при ограниченной совокупности измерений. Позднее была предложена интерполяционно-гидравлическая модель учета стока в зарастающем русле [6–8], в которой в качестве характеристики

изменения пропускной способности русла используется так называемый параметр Великанова m_3 , определяющийся непосредственно по данным измеренных расходов воды

$$m_3 = \sqrt{I/n_3} = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}}, \quad (1)$$

где ω – площадь поперечного сечения русла;

B – ширина русла;

I – уклон свободной поверхности;

n_3 – коэффициент шероховатости заросшего русла.

В интерполяционно-гидравлической модели используется свойство параметра Великанова сохранять относительное постоянство при однородной шероховатости русла и малых изменениях уклонов водной поверхности независимо от колебаний расходов воды. При использовании этой модели в режимном варианте учета стока в интервалах между измерениями выполняется интерполяция значений параметра Великанова. При расчете оперативных расходов воды можно предложить выполнять экстраполяцию значений параметра в интервале от состоявшегося до следующего измерения. Формула для расчета оперативного значения расхода воды в этом случае запишется в виде

$$Q_t = m_{3t} \frac{\omega_t^{5/3}}{B_t^{2/3}}, \quad (2)$$

где Q_t – значение расчетного оперативного расхода воды на дату t , м³/с;

m_{3t} – значение экстраполированного на расчетную дату t параметра Великанова;

ω_t – значение площади поперечного сечения русла, полученное по зависимости $\omega_3(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на дату t ;

B_t – значение ширины русла, полученное по зависимости $B_3(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на дату t .

Ниже приведены результаты расчета оперативных расходов воды с использованием интерполяционно-гидравлической модели и усовершенствованной методики, в основу которой положен алгоритм, описанный в [2, 8, 9].

При использовании методики, изложенной в [2, 3], ежедневные расходы воды как в режимном, так и в оперативном вариантах учета стока для периода зарастания рекомендуется вычислять по формуле

$$Q_t = Q(H_t)(1 + \tilde{q}), \quad (3)$$

где Q_t – значение расчетного ежедневного расхода воды на дату t , м³/с;

$Q(H_t)$ – значение расхода воды, рассчитанное по уравнению принятой опорной кривой расходов для уровня воды на дату t ;

\tilde{q} – значение относительного отклонения измеренного расхода воды от принятой кривой расходов.

Следует отметить, что относительные отклонения \tilde{q} связаны с переходными коэффициентами $K_{\text{зар}}$ очевидным соотношением

$$\tilde{q} = \frac{Q_{\text{зар}_и} - Q(H_{и})}{Q(H_{и})} = K_{\text{зар}} - 1. \quad (4)$$

При этом, как отмечено в [2, 3, 9], хронологическая последовательность относительных отклонений (поправок) $\tilde{q}(t)$ в пределах фазово-однородных периодов может рассматриваться как случайный временной процесс и его дальнейшее изучение осуществляется с привлечением методов анализа временных рядов, для которых можно оценить такие статистические характеристики как математическое ожидание, дисперсию и нормированную автокорреляционную функцию (АКФ) временного ряда. Временной ряд отклонений $\tilde{q}(t)$ включает две составляющие [10, 11]:

- сигнал, который отражает изменения гидравлико-морфологических условий протекания потока;
- белый шум, значительная часть которого обусловлена случайными погрешностями измерения расходов воды.

Для более достоверной оценки оперативных значений расходов воды необходимо учитывать только первую составляющую ряда $\tilde{q}(t)$, по возможности исключив из исходных данных составляющую, обусловленную случайными погрешностями измерения. Одним из методов, позволяющих сглаживать влияние случайных погрешностей измерения, является метод оптимальной экстраполяции, адаптированный применительно к учету стока [9, 12]. Основные положения метода изложены в [9].

На основе анализа хронологических графиков относительных отклонений установлено [13, 14], что, как правило, изменение характеристик пропускной способности русла во времени принимает циклический (квазициклический) характер, образуя полные реализации цикла за период наблюдений T_H . В случаях наличия неоднозначной связи расходов и уровней хронологический ход относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ можно представить в виде косинусоиды, уравнение которой в общем виде можно представить следующим образом:

$$\tilde{q} = \alpha \cos(2\pi t / T_H + \phi), \quad (5)$$

где $\alpha = |\tilde{q}_{\text{max}}|$ – осредненные по модулю наибольшие значения \tilde{q} ;

T_H – продолжительность периода, в течение которого связь $Q(H)$ неоднозначна;

τ – параметр сдвига в долях T_H ;

ϕ – фаза.

При таком представлении нормированная автокорреляционная функция случайного процесса, отраженного косинусоидой, также может быть представлена в виде тригонометрической функции

$$r(t) = \cos(2\pi t / T_H), \quad (6)$$

Такое представление автокорреляционной функции позволяет без дополнительных учащенных измерений расходов воды в период зарастания оценить значения корреляционной связанности во времени характеристик пропускной способности русла и использовать метод оптимальной экстраполяции [9, 12].

Рассмотрим возможность применения такого подхода к периоду зарастания русла. На рис. 2 представлены данные наблюдений на р. Матыра у с. Крутое за 2010 г. Показано, что с началом зарастания (в начале мая) значения \tilde{q} резко уменьшаются (период нарастания растительности); с конца июня и до середины августа достигают минимальных (период относительно стабильного состояния); затем начинают плавно увеличиваться и достигают некоторых постоянных значений с наступлением отрицательных температур и появлением ледяных образований (что соответствует периоду отмирания растительности).



Выполним аппроксимацию графика отклонений \tilde{q} косинусоидой (5). Для этого определим значения параметров, входящих в формулу (5):

– $\alpha = |\tilde{q}_{max}|$ – значения как среднее из значений отклонений \tilde{q} за период приблизительно стабильного состояния русла ($\alpha = 0,712$);

– продолжительность периода, когда связь $Q(H)$ была неоднозначной, принимаем равной длительности всего периода зарастания (из данных наблюдений) $T = 214$ сут;

– параметр сдвига $\tau = 1$ сут;

– фаза функции косинуса $\phi = \pi/2$.

Представим полученную функцию в графическом виде (рис. 3). Построенный график косинусоиды недостаточно адекватно аппроксимирует реальный ход отклонений \tilde{q} , особенно на ветви нарастания водной растительности. В данном случае целесообразно подобрать две разные функции косинуса – для периодов нарастания и спада водной растительности. Подобранные следующие аппроксимирующие зависимости, наиболее адекватно отражающие изменение отклонений \tilde{q} :

– для периода нарастания

$$\tilde{q}_{H\cos} = \alpha_H \cos(2\pi t / 4T_H + \pi/2), \quad (7)$$

– для периода спада (отмирания) водной растительности

$$\tilde{q}_{C\cos} = \alpha_C \cos(2\pi t / 4T_C + \pi), \quad (8)$$

где $\tilde{q}_{H\cos}$ – значения относительных отклонений в период нарастания;

$\tilde{q}_{C\cos}$ – значения относительных отклонений в период спада (отмирания) водной растительности;

$\alpha_H = |\tilde{q}_{maxH}|$ – максимальное (по модулю) значение отклонения \tilde{q} в период роста;

$\alpha_C = |\tilde{q}_{maxC}|$ – максимальное (по модулю) значение отклонения \tilde{q} в период спада;

τ – время от начала периода нарастания/отмирания водной растительности, сут;

T_H – период нарастания водной растительности, сут;

T_C – период спада (отмирания) водной растительности, сут;

$\pi = 3,14$.

На рис. 4 представлен хронологический график относительных отклонений \tilde{q} : с нанесенными на него значениями \tilde{q}_{\cos} , рассчитанными по формулам (7) и (8). Подобранные косинусоиды (7) и (8) достаточно точно аппроксимируют реальный ход отклонений \tilde{q} .

Нормированные АКФ для периодов нарастания и спада растительности в этом случае выглядят так:

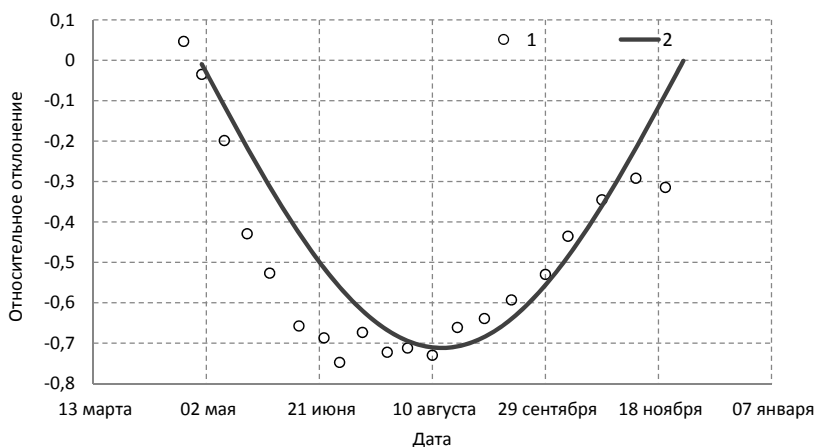


Рис. 3. Хронологический ход относительных отклонений q за период зарастания русла в 2010 г. на р. Матыра в створе с. Крутое (1), аппроксимированный косинусоидой (2), рассчитанной по формуле (5).

– для периода нарастания водной растительности

$$r(t) = \cos(2\pi t / 4T_H), \quad (9)$$

– для периода спада (отмирания) водной растительности

$$r(t) = \cos(2\pi t / 4T_C), \quad (10)$$

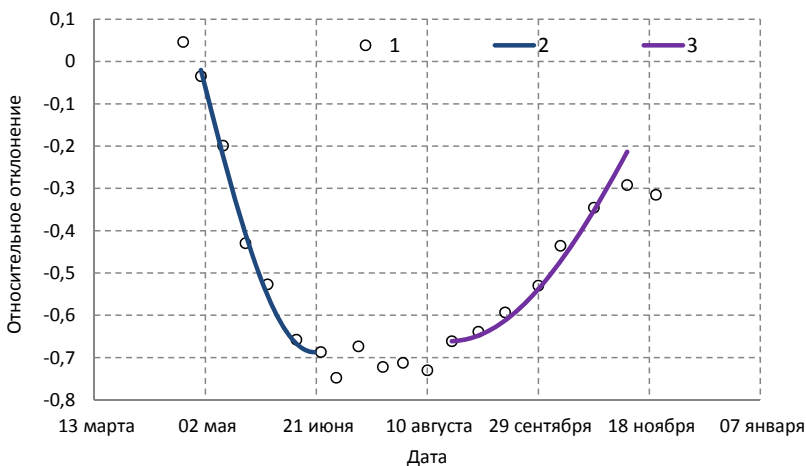


Рис. 4. Хронологический ход относительных отклонений \tilde{q} за период зарастания русла р. Матыра в створе с. Крутое в 2010 г. (1), аппроксимированный косинусоидой (2), рассчитанной по формуле (7) и косинусоидой (3), рассчитанной по формуле (8).

Рассмотрим вариант использования предложенных алгоритмов для расчета оперативных значений расходов воды р. Матыра в створе гидрологического поста с. Крутое в период зарастания 2012 г.

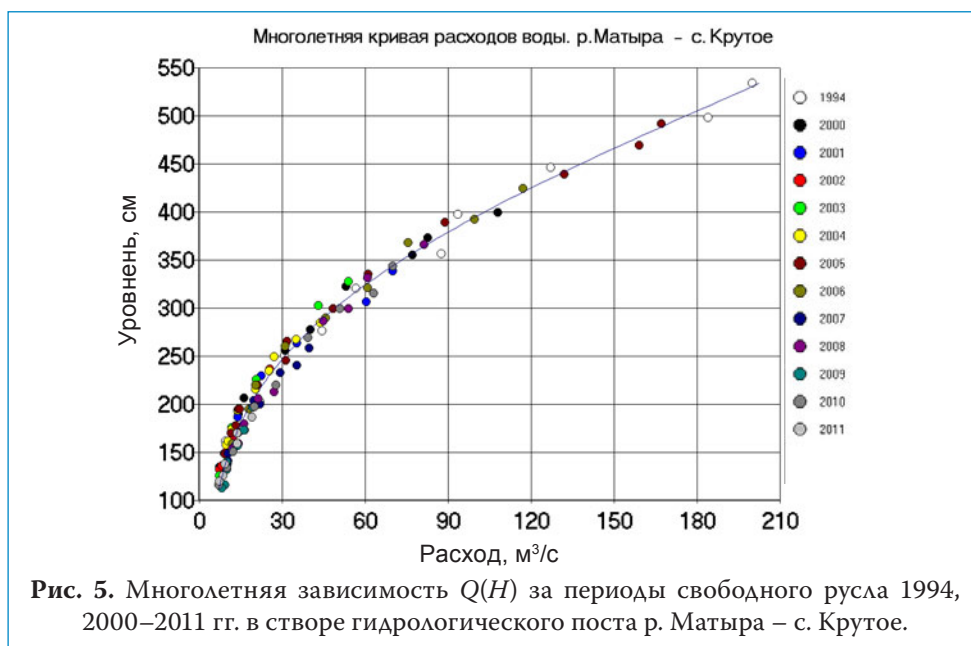
Матыра – средняя равнинная река (полная площадь бассейна 5180 км²), приток р. Воронеж (бассейн Дона). Площадь водосбора до гидрометрического створа с. Крутое составляет 2670 км². На изменение пропускной способности русла в теплое время года оказывают влияние деформации дна и берегов, зарастание водной растительностью. Коэффициенты шероховатости n в теплое время года изменяются в расчетном створе от 0,03 при свободном состоянии русла до 0,085÷0,1 в период наиболее развитой водной растительности.

Очевидно, что для оценки параметров уравнений, которые предложено использовать для оперативного учета стока в 2012 г., необходимо привлечь данные наблюдений за ряд предшествующих лет. Прежде всего, для оперативного учета стока необходимо выбрать опорную кривую расходов. В данном случае в качестве опорной принимается МКР, построенная по точкам расходов воды, измеренных за периоды свободного русла 1994, 2000–2011 гг. (рис. 5). Аналитическое представление кривой получено в виде полиномиальной зависимости с ограничениями, заданными при наименьшем наблюдаемом за многолетие уровне воды. Подбор параметров уравнения регрессии выполнен с использованием алгоритма, изложенного в [2] с применением метода наименьших квадратов (МНК) [15]. Ограничения задаются на основе анализа данных измеренных расходов воды (ИРВ) за весь период наблюдений в нижнем диапазоне уровней воды. В данном случае заданы ограничения, которые должны обеспечить, чтобы при уровне воды 0,85 м над «0» поста вычисленный по уравнению кривой расход воды оказался равен 5 м³/с. Для удобства представления коэффициентов уравнения при расчетах уровня воды в исходной совокупности данных рекомендуется выражать не в см над «0» поста, как это принято в гидрологии, а в метрах. По данным ИРВ свободного русла 1994, 2000–2011 гг. получено следующее аналитическое представление зависимости $Q(H)$:

$$Q = -3,98 + 16,873H - 11,54H^2 + 5,2112H^3 - 0,4291H^4. \quad (11)$$

Уравнение получено для диапазона уровней от 85 до 535 см над «0» поста (0,85 – 5,35 м над «0» поста).

В качестве характеристики изменения пропускной способности русла в соответствии с методикой [2,3] используем относительные отклонения измеренных расходов воды \tilde{q} от опорной МКР. На рис.6 серыми точками показан хронологический ход относительных отклонений \tilde{q} расходов воды, измеренных за периоды зарастания русла, входящих в совокупность лет, от



опорной МКР. Как видно, такой ход \tilde{q} характерен для р. Матыра для каждого из включенных в исходную совокупность года. Выполним аппроксимацию хода относительных отклонений q с использованием тригонометрической функции косинуса отдельно для ветви нарастания водной растительности и ветви ее отмирания.

Для определения параметров уравнений косинусоиды (6) и (7) проведен анализ имеющихся данных наблюдений за периоды зарастания русла предшествующих лет. Путем осреднения определены даты начала и окончания зарастания.

Сложнее определить даты окончания нарастания и начала отмирания. С этой целью необходимо построить хронологические графики отклонений \tilde{q} измеренных расходов каждого года от опорной кривой (по образцу рис. 2). За дату последнего дня роста рекомендуется принимать дату измеренного расхода, когда прекращается резкое увеличение (по модулю) значений \tilde{q} . Например, для периода зарастания 2010 г. это 12 июня (рис. 2), после наступает период относительно стабильного состояния растительности. За дату первого дня спада (отмирания) растительности целесообразно принять дату измеренного расхода, с которой начинается явное уменьшение по модулю значений \tilde{q} . Для 2010 г. это 21 августа (рис. 2). Средние даты окончания нарастания и начала спада определяются путем простого осреднения соответствующих дат всех рассматриваемых предшествующих лет.

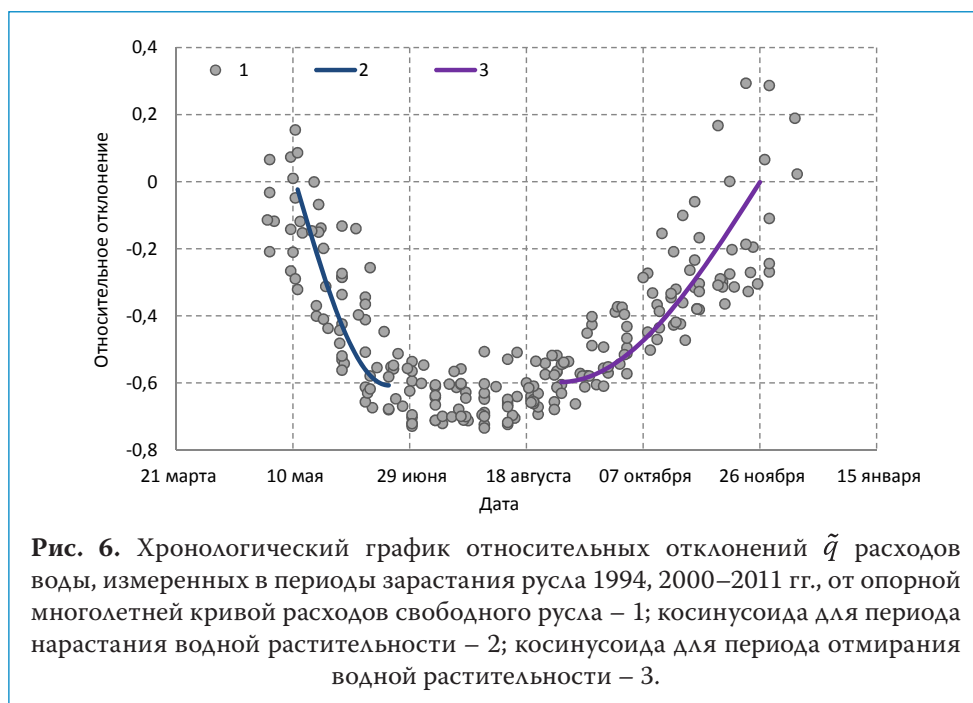


Рис. 6. Хронологический график относительных отклонений \tilde{q} расходов воды, измеренных в периоды зарастания русла 1994, 2000–2011 гг., от опорной многолетней кривой расходов свободного русла – 1; косинусоида для периода нарастания водной растительности – 2; косинусоида для периода отмирания водной растительности – 3.

Значение τ для периодов нарастания/спада принимается равным

$$\tau = 1, 2, 3 \dots n, \quad (12)$$

где n – последний по счету день нарастания/отмирания растительности.

Длительности периодов нарастания и отмирания легко вычисляются как разности дат окончания и начала соответствующих периодов. Значение параметра a вычисляется для периода нарастания как среднее из максимальных (по модулю) значений \tilde{q} , рассчитанных на даты, принятые за последние дни периодов нарастания водной растительности каждого из рассмотренных лет. Значение параметра a для периода спада вычисляется как среднее из максимальных (по модулю) значений \tilde{q} , рассчитанных на даты, принятые за первые дни периодов отмирания растительности каждого из лет

$$a_H = \frac{\sum_1^n |q_{max H}|}{n}, \quad (13)$$

$$a_C = \frac{\sum_1^n |q_{max C}|}{n}, \quad (14)$$

где n – число лет в совокупности.

В результате получены следующие параметры уравнений (7) и (8) хода относительных отклонений в период зарастания русла:

- для периода нарастания водной растительности: $a_H = 0,607$, $T_H = 40$;
- для периода спада (отмирания) водной растительности: $a_C = 0,607$, $T_C = 86$.

На рис. 6 показаны отрезки косинусоид, построенные по соответствующим уравнениям для периодов роста (2) и отмирания (3) водной растительности. АКФ рассчитаны по формулам (8), (9). На рис. 7 представлены автокорреляционные функции: 1 – АКФ, рассчитанная по формуле (9) для периода нарастания; 2 – АКФ, рассчитанная по формуле (10) для периода спада водной растительности: в период нарастания связанность между значениями ряда $\tilde{q}(t)$ значительно меньше, чем в период спада.

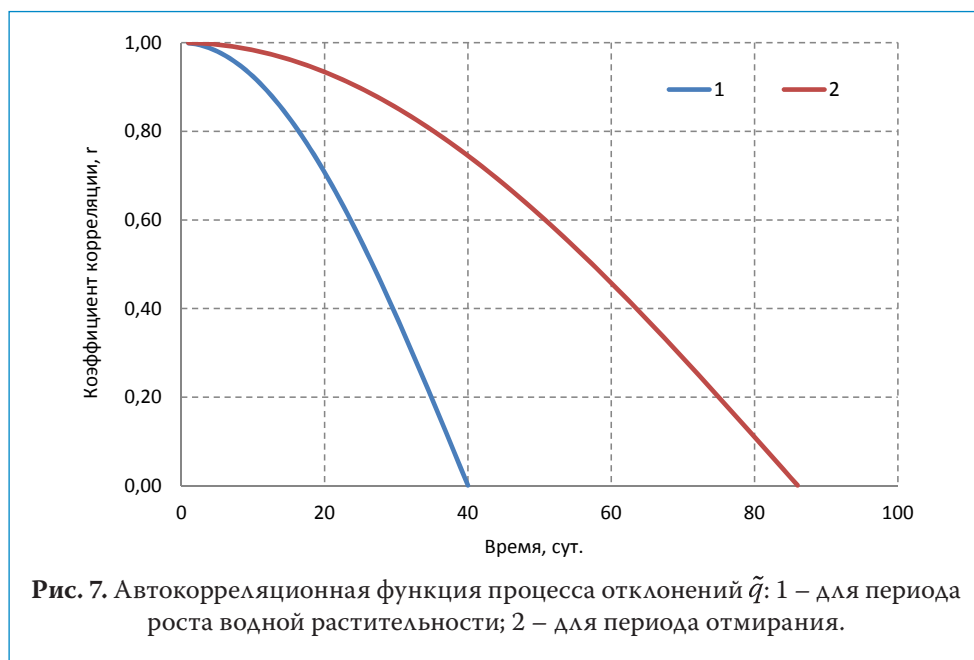


Рис. 7. Автокорреляционная функция процесса отклонений \tilde{q} : 1 – для периода роста водной растительности; 2 – для периода отмирания.

Представленные на рис. 6 отрезки косинусоид (2) и (3) отражают осредненные за многолетие характеристики пропускной способности русла в створе р. Матыра – с. Крутое в период его зарастания. На графике разброс точек $\tilde{q}_{и}$, соответствующих измеренным расходам воды, достаточно велик относительно осредняющих линий: среднее квадратическое значение разброса точек $\tilde{q}_{и}$ для обеих линий составляет 0,14, для линии нарастания водной растительности равно 0, для линии отмирания – 0,025. При этом в отдельные годы все отклонения могут иметь или положительный, или от-

рицательный знак, поэтому для расчета оперативных расходов воды необходимо учитывать особенности изменения пропускной способности русла в каждом конкретном году. Будем учитывать эти особенности на основе рядов остаточных отклонений $\tilde{q}_И''$ от значений, рассчитанных по уравнению косинусоиды \tilde{q}_{\cos}

$$\tilde{q}_И'' = \tilde{q}_И - \tilde{q}_{\cos}. \quad (15)$$

Значения поправок $\tilde{q}_Э$ в формуле (3) рассчитываем по формуле оптимальной экстраполяции, которая в этом случае запишется в виде

– для периода нарастания водной растительности

$$\tilde{q}_{ЭН} = p_1 \tilde{q}_И'' + p_2 \tilde{q}_И'' + \tilde{q}_{Н\cos}, \quad (16)$$

– для периода спада (отмирания) водной растительности

$$\tilde{q}_{ЭС} = p_1 \tilde{q}_И'' + p_2 \tilde{q}_И'' + \tilde{q}_{С\cos}. \quad (17)$$

Формулы для расчета весовых коэффициентов оптимальной экстраполяции в этом случае записываются следующим образом

$$p_1 = \frac{(1 + \eta) r(\tau_{01}) - r(\tau_{02}) r(\tau_{12})}{(1 + \eta)^2 - [r(\tau_{12})]^2}, \quad (18)$$

$$p_2 = \frac{(1 + \eta) r(\tau_{01}) - r(\tau_{02}) r(\tau_{12})}{(1 + \eta)^2 - [r(\tau_{12})]^2}, \quad (19)$$

где $r(t)$ – значения АКФ для интервалов времени;

τ_{01} – интервал времени от даты расчета оперативного расхода воды t до даты последнего ИРВ;

τ_{02} – интервал времени от даты расчета оперативного расхода воды t до даты предпоследнего ИРВ;

τ_{12} – интервал между датами последнего и предпоследнего ИРВ;

η – мера погрешности измерения расходов воды, равная для исследуемых рядов относительных отклонений $\tilde{q}(t) = 0,04$ при принятой относительной случайной погрешности измерения расходов воды при зарастании $\tilde{\sigma}_И = 0,1$.

Исследования показали, что в период относительно стабильного состояния водной растительности, когда не происходит значительного изменения пропускной способности русла, поправки $\tilde{q}_Э$ в формуле (3) можно вычислять методом скользящего среднего [1] с использованием значений относительных отклонений двух или трех последних измерений расходов воды.

Оценка эффективности предлагаемой методики оперативного учета стока выполнена по результатам сравнения данных оперативного и режимного учета. Относительные погрешности ежедневных оперативных расходов воды определяли по формуле

$$\delta_{\text{опер } t} = \frac{Q_{\text{опер } t} - Q_{\text{реж } t}}{Q_{\text{реж } t}} \cdot 100\%, \quad (20)$$

где $Q_{\text{реж } t}$ – значение ежедневного расхода воды по данным, опубликованным в справочниках водного кадастра «Ежедневные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши».

Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета за весь период зарастания русла рассчитывается по формуле

$$\delta_{\text{опер}} = \sqrt{\frac{\sum_1^N \delta_{\text{опер } t}^2}{N-1}}, \quad (21)$$

где N – количество членов ряда.

Систематические погрешности оперативного учета стока определяли как средние значения по всей совокупности относительных погрешностей оперативного учета стока в период зарастания. Значение максимально допустимой относительной погрешности оперативного учета стока принято равным 15%. Расчет ежедневных оперативных расходов воды вели по формуле (3). Поправку \tilde{q}_3 в периоды нарастания и спада водной растительности вычисляли по формулам (16) и (17), в период относительно стабильного состояния – по методу скользящего среднего [1]. На рис. 8 представлен график хода фактических $\tilde{q}_И$ и рассчитанных \tilde{q}_3 по предлагаемой методике характеристик изменения пропускной способности русла в период зарастания 2012 г. р. Матыра в створе с. Крутое. На рис. 9 отражены режимный и оперативный гидрографы стока р. Матыра в створе с. Крутое за период зарастания русла 2012 г.

Расчет оперативных расходов воды в периоды зарастания русла 2008–2013 гг. выполнен по двум методикам: по описанной выше и с использованием интерполяционно-гидравлической модели [6, 8]. Результаты сравнения относительных погрешностей определения ежедневных оперативных расходов воды и случайных среднеквадратических погрешностей оперативного учета стока приведены в табл. 1. Расчет оперативных расходов воды в период зарастания русла с использованием предлагаемой методики позволяет существенно снизить случайные среднеквадратические, систематические и наибольшие погрешности оперативного учета стока.

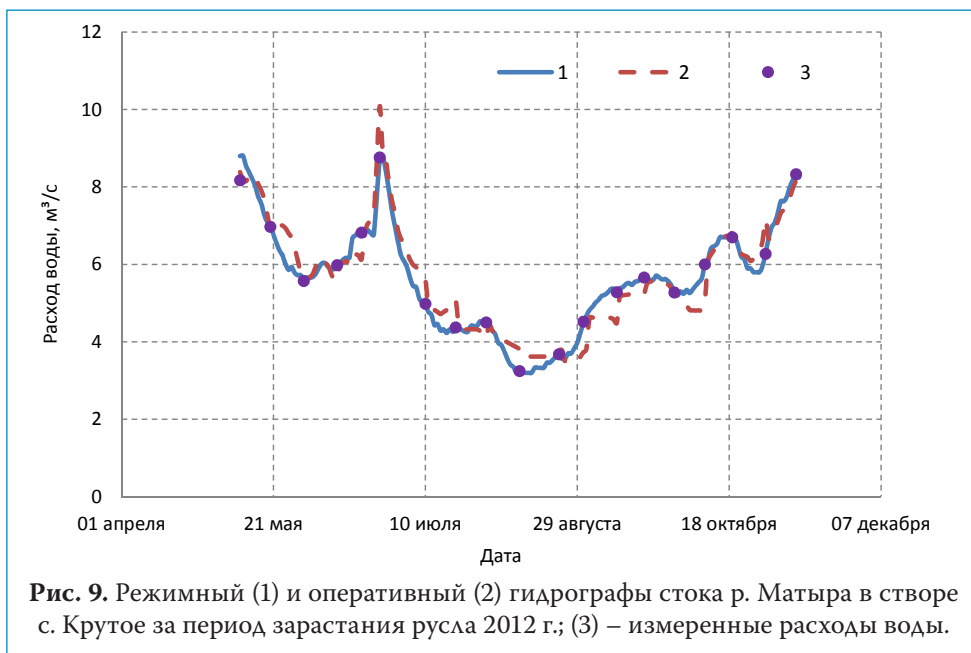
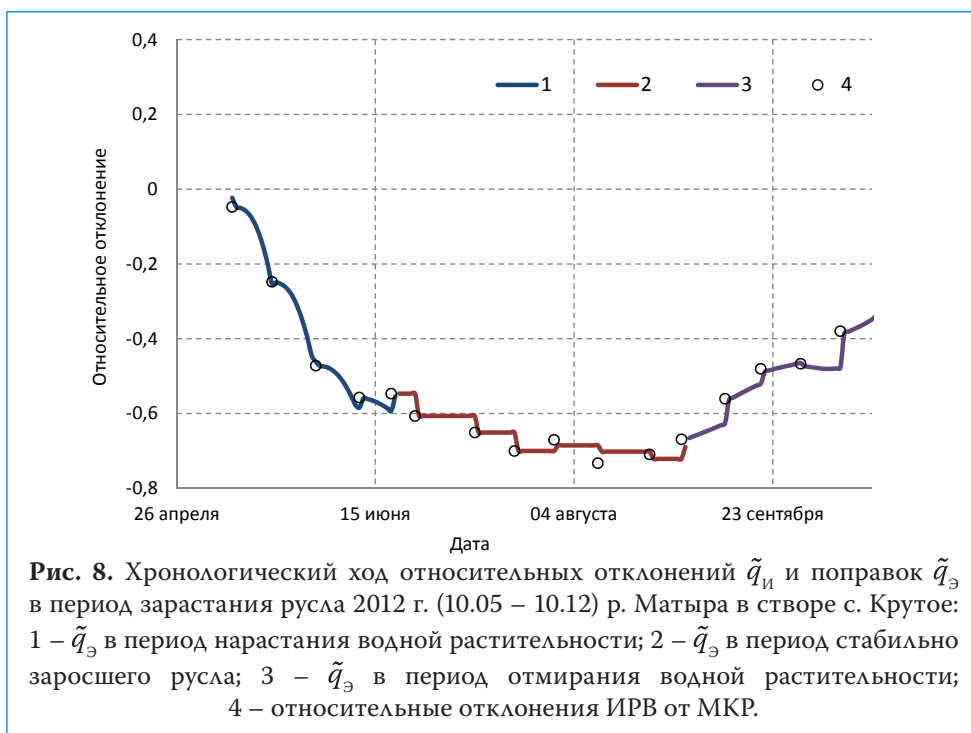


Таблица 1. Оценка точности оперативного учета стока в период зарастания русла

Год	Опорная многолетняя кривая, годы	Количество суток с $\delta_{\text{опер}} \leq 15\%$, в % от общего числа суток в периоде				Система- тическая, средняя, %		Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета стока $\delta_{\text{опер}}$			
		зараста- ние (весь период)	рост водной расти- тельности	ста- бильное состояние	спад водной расти- тельности	Спа- д	Рост	Зараста- ние (весь период)	рост расти- тельно- сти	ста- бильное состояние	спад водной раститель- ности
Интерполяционно-гидравлическая модель											
2008	1994, 2000–2007	16	36	5	18	-3,4	11,3	14,0	6,1	13,1	
2009	1994, 2000–2008	5	10	8	0	-3,4	8,1	9,5	8,7	7,1	
2010	1994, 2000–2009	15	33	22	0	5,7	11,3	14,7	14,0	5,4	
2011	1994, 2000–2010	12	28	14	0	5,1	12,5	19,2	12,3	5,3	
2012	1994, 2000–2011	13	21	16	8	-1,2	9,8	10,8	10,5	8,9	
2013	1994, 2000–2012	13	48	0	9	1,3	10,4	19,3	4,3	8,3	
Предлагаемая методика											
2008	1994, 2000–2007	5	0	7	6	-1,2	7,3	6,6	7,3	7,7	
2009	1994, 2000–2008	8	3	17	2	-2,3	8,9	8,6	10	7,6	
2010	1994, 2000–2009	4	6	5	0	1,7	7,4	8,4	7,9	6,1	
2011	1994, 2000–2010	1	9	0	0	1,7	5,8	8,8	5,2	3,8	
2012	1994, 2000–2011	7	0	8	8	1,3	7,9	5,8	9,2	7,7	
2013	1994, 2000–2012	10	26	0	10	-0,6	8,2	11,2	4,0	9,9	

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования установлено, что предложенная методика позволяет существенно уточнить расчет оперативных расходов воды в период зарастания русла, т. к. дает возможность учитывать резкое изменение пропускной способности русла при бурном развитии водной растительности (по сравнению с интерполяционно-гидравлической моделью). Следует отметить, что отдельные случаи превышения допустимой погрешности наблюдаются в каждом из исследованных периодов зарастания. Можно предположить, что превышение допустимой погрешности в период роста может быть связано с недоучетом бурного развития растительности вследствие резкого потепления. В период относительно стабильного состояния растительности неточности возникали вследствие резкого изменения величины отклонений \tilde{q} . Установлено, что снижение пропускной способности русла, которому соответствует увеличение абсолютных значений \tilde{q} , может происходить в результате потепления и, как следствие, более бурного развития растительности. И, наоборот, увеличение пропускной способности русла может происходить с уменьшением значений \tilde{q} по модулю после значительных осадков и паводков и пригибания водной растительности ко дну.

В период отмирания водной растительности допустимая погрешность оперативного учета стока может быть превышена из-за недоучета увеличения пропускной способности русла при прохождении небольших дождевых паводков. Также следует принять во внимание, что большое значение для надежного расчета оперативных расходов воды имеет точность исходных данных об уровнях и измеренных расходах. Любое увеличение погрешностей измерения уровней или расходов воды влечет за собой неизбежные ошибки при расчете оперативных расходов.

Таким образом, при разработке методов гидрометрического учета стока на зарастающих реках необходимо учитывать особенности изменения пропускной способности русел в различные фазы развития водной растительности. Предлагаемая усовершенствованная методика оперативного учета стока позволяет на объективной основе учитывать особенности изменения пропускной способности заросшего русла в периоды нарастания и отмирания водной растительности, а также в период стабильного состояния заросшего русла. Случайные погрешности оперативного учета стока при использовании разработанной методики составляют в среднем 4–10 %, систематические не превышают 2 %, что свидетельствует о ее достаточно высокой эффективности. Предлагаемая методика может быть рекомендована к использованию при разработке методов оперативного учета стока на гид-

рологических постах со схожими условиями зарастания русла, а именно – на тех постах, где в течение ряда лет сохраняются закономерности условий зарастания, и хронологический ход средних многолетних характеристик изменения пропускной способности русла может быть аппроксимирован тригонометрической функцией.

Дальнейшие исследования по усовершенствованию разработанной методики оперативного учета стока должны быть направлены на разработку алгоритмов, позволяющих учитывать при расчетах изменения температур воздуха и воды, наличие осадков на водосборе выше расчетного гидрологического поста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
2. Карасев И.Ф., Яковлева Т.И. Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока // Докл. VI Всерос. гидролог. съезда. М.: Росгидромет, 2006. С. 156–163.
3. Яковлева Т.И. Усовершенствование и адаптация моделей гидрометрического учета стока при неоднозначных зависимостях расходов от уровней воды // Сб. работ по гидрологии ГГИ. 2003. № 26. С. 58–69.
4. Наставление гидрологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. III: Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 292 с.
5. Карасев И.Ф., Сунцова Е.Б. Пропускная способность русла и учет стока зарастающих рек // Гидротехническое строительство. 2001. № 1. С. 44–55.
6. Карасев И.Ф., Векишина Т.В. Режим гидравлических сопротивлений при зарастании русел // Тр. Академии водохозяйственных наук. Вып. 9. Проблемы русловедения. М.: МГУ, 2003. С. 112–122.
7. Карасев И.Ф., Векишина Т.В. Расчетная оценка гидравлических сопротивлений русел зарастающих рек // Мат-лы междунар. научно-теоретич. конф. «Гидравлика» / СПб.: СПбГПУ, 2004. С. 68–70.
8. Векишина Т.В., Зажимаров С.А. Усовершенствованная методика гидрометрического учета стока зарастающих рек // Сб. работ по гидрологии ГГИ. 2004. № 27. С. 3–9.
9. Яковлева Т.И. Оценка изменчивости пропускной способности русла на основе модели «сигнал плюс шум» // Вопросы гидрологии суши. 1991. С. 209–214.
10. Поляк И.И. Модели «сигнал плюс шум» и осреднение по пространству временных рядов // Метеорология и гидрология. 1985. № 9. С. 46–53.
11. Карасев И.Ф., Яковлева Т.И. Экстраполяционно-аналитический метод оперативного учета стока рек с неустойчивым руслом (на примере р. Амударья) // Тр. ГГИ. 1988. Вып. 325. С. 19–30.
12. Гандин А.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 360 с.

13. Карасев И.Ф., Яковлева Т.И. Методы оценки погрешностей гидрометрического учета речного стока // Метеорология и гидрология. 2001. № 6. С. 96–106.
14. Shiklomanov A.I., Yakovleva T.I., Lammers R.B., Karasev I.Ph., Vörösmarty C.J., Linder E. Cold Region River Discharge Uncertainty: Estimates from Large Russian Rivers // J. of Hydrology. No 326. 2006. P. 231–256.
15. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М.: Мир, 1980. 456 с.

Сведения об авторе:

Шарина Юлия Валерьевна, научный сотрудник, отдел гидрометрии и гидрологической сети, ФГБУ «Государственный гидрологический институт»; Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, 23; e-mail: yulia_sharina@mail.ru.