

## ОПЕРАТИВНЫЙ УЧЕТ РЕЧНОГО СТОКА В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ЯНА В ГИДРОСТВОРЕ ГОРОДА ВЕРХОЯНСКА)

**Ю.В. Изьюрова**

E-mail: yulia.hydrologist@yandex.ru

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

**АННОТАЦИЯ:** Оперативный вариант учета речного стока подразумевает вычисление значений расходов воды практически в режиме реального времени для обеспечения задач прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений, ежедневного контроля водности рек и информационного обеспечения функционирования объектов водного хозяйства в речных бассейнах. В настоящее время актуальна задача автоматизации оперативного учета стока.

В статье представлено исследование двух методов расчета оперативных расходов воды в условиях неустановившегося движения потока, позволяющих осуществить переход к автоматизации оперативного учета речного стока. Первый основан на использовании метода оптимальной экстраполяции относительных отклонений измеренных расходов воды от опорной кривой расходов, полученной по данным измерений расходов воды за прошлые годы. Второй метод представляет новый подход к применению формулы Джонса. Параметры формулы Джонса были получены по данным измерений расходов воды за прошлые годы с использованием инструмента оптимизации на основе метода обобщенного приведенного градиента. Ежедневные оперативные расходы воды, вычисленные двумя методами, сравнивались с ежедневными режимными расходами воды. В результате исследования установлено, что оба метода могут применяться для расчета оперативных расходов воды в условиях неустановившегося движения потока и способствовать переходу к автоматизации оперативного учета речного стока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оперативный учет речного стока, кривая расходов, неустановившееся движение потока, паводочная петля, половодье, паводок, ежедневные расходы воды.

Основная задача гидрометрии состоит в том, чтобы воспроизвести гидрограф стока – последовательность ежедневных (средних суточных) расходов воды (ЕРВ) как непрерывную функцию времени по результатам дискретных измерений расходов и непрерывных наблюдений за уровнями воды [1].

© Изьюрова Ю.В., 2021

Задача оперативного учета стока заключается в получении срочных и ежедневных значений расходов воды по данным актуальных наблюдений за уровнем воды и совокупности измеренных расходов, выполненных в период, предшествующий моменту расчета. Вычисление оперативных расходов воды осуществляется в оперативно-прогностических подразделениях ЦГМС и УГМС, занятых оперативно-прогностической деятельностью и гидрометеорологическим информационным обслуживанием. Эти данные используются для ежедневного контроля водности рек, прогноза притока к гидротехническим узлам и водохранилищам, решения задач прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений [2].

Наиболее сложной задача учета речного стока становится при отсутствии однозначной зависимости расходов от уровней воды (кривой расходов  $Q(H)$ ). Одной из причин нарушения однозначности зависимости  $Q(H)$  является неустановившееся движение потока, когда связь между расходом и уровнем воды в гидростворе гидрологического поста нарушается при прохождении волн паводков, половодий или попусков из водохранилищ. При неустановившемся движении потока расходы воды на подъеме паводка при одном и том же уровне оказываются больше, чем на спаде паводка вследствие различия в уклонах водной поверхности. При этом точки  $(Q, H)$  на графике зависимости расходов и уровней воды образуют петлеобразные зависимости – «паводочные петли» [3].

Традиционным способом учета речного стока при неустановившемся движении потока является его вычисление по кривым расходов подъема и спада, образующим в совокупности петлеобразную кривую. Не всегда удается получить удовлетворительные аппроксимации ветвей подъема и спада в поле точек  $(Q, H)$ . Это может происходить в случае редких измерений расходов воды или их пониженной точности, а также в ситуации прохождения нескольких последовательных паводочных волн, когда паводочные петли накладываются друг на друга. Построение петлеобразных зависимостей осуществляется вручную, что совершенно недопустимо в условиях современного развития компьютерных технологий.

Цель исследования, результаты которого изложены в настоящей статье, – разработка методики оперативного учета речного стока в условиях неустановившегося движения потока как при наличии, так и при отсутствии измеренных расходов воды (ИРВ) в расчетном периоде. Разработанная методика должна способствовать переходу к автоматизации оперативного учета речного стока.

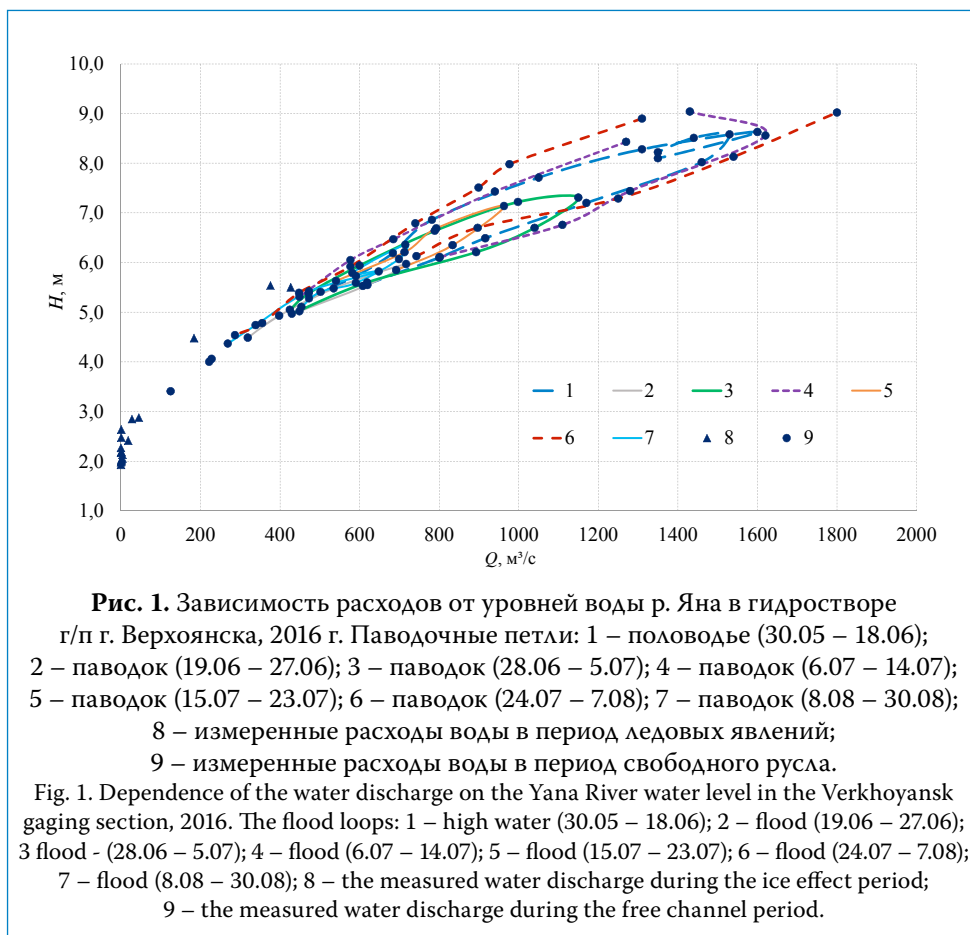
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

База данных для проведения исследования включала информацию о всех гидрологических измерениях и наблюдениях на участке гидрологического поста (г/п) г. Верхоянск на р. Яна за период с 1992 по 2019 гг. Расчет оперативных расходов воды осуществлялся для периодов неустановившегося движения 2012–2019 гг. В результате анализа годовых и многолетних кривых расхода установлено, что петлеобразная связь расходов и уровней прослеживается, если наивысший уровень воды при прохождении волны половодья/паводка превышает 550–600 см.

Режим р. Яна в гидростворе г. Верхоянска характеризуется резко выраженным неустановившимся движением потока при прохождении волн половодий и паводков – появлением накладывающихся друг на друга петлеобразных зависимостей расходов от уровней воды. Так, в 2016 г. наблюдалось двухвершинное половодье и идущие друг за другом шесть паводков различной величины. При этом, чем выше фиксировался подъем уровня воды во время половодья/паводка, тем шире становилась петлеобразная связь расходов и уровней воды, а следовательно, более выражен эффект неустановившегося движения потока (рис. 1). Паводочные петли № 4 и № 6 прерываются, т. к. уровни воды выходят за пределы диапазона, в котором производились измерения расходов воды.

Учет речного стока в период половодья на рассматриваемом участке осложняется тем, что максимальный подъем уровня воды может наблюдаться еще при наличии ледовых явлений, что делает невозможным измерение расходов воды по соображениям техники безопасности. Традиционным методом расчета ЕРВ в этот период является использование зимних переходных коэффициентов [3]. Расчет ЕРВ в периоды паводков при свободном состоянии русла затруднен тем, что при выходе воды на пойму при уровне выше 900 см измерение расходов воды становится сложным или невозможным. Максимальный исторический уровень воды (МИУВ) – 1109 см – зафиксирован 27 июня 2004 г. В связи с вышеизложенным появляется необходимость экстраполяции кривых расхода за пределы диапазона измерений расходов воды.

Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерения должна опираться на надежно определенные геометрические и морфометрические характеристики русла и прирусловых форм на участке гидроствора. С этой целью выполняется нивелировка морфометрического створа до положения высших наблюдаемых уровней воды. Наличие данных нивелировки поперечного профиля позволяет вычислить глубину и площадь поперечного сечения русла при разных отметках уровня воды и получить зависимость площадей поперечного сечения русла от уровня воды ( $\omega = f(H)$ ) на всем диапазоне наблюдаемых уровней воды, в т. ч. за пределами диапазона уровней, в котором производились измерения расходов воды.



### Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерения

При отсутствии измеренных уклонов поверхности воды рекомендуется [2] использовать формулу, полученную И. Ф. Карасевым [1]:

$$Q_3 = Q_i (\omega_3 / \omega_i)^m, \quad (1)$$

где  $Q_3$  – расход в любой фазе водного режима за пределами диапазона измерений, который следует определить,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_i$  – расход воды, вычисленный по кривым расхода  $Q(H)$  в пределах диапазона измерений,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\omega_i$  – площадь живого сечения потока, соответствующая  $Q_i$  и рассчитанная на основе поперечного профиля гидроствора или по уравнению зависимости  $\omega(H)$ ,  $\text{м}^2$ ;

$\omega_3$  – площадь живого сечения, соответствующая  $Q_3$ ,  $\text{м}^2$ ;

$m_i$  – параметр, вычисляемый на основе смежных во времени расходов воды и площадей живого сечения русла, определенным по соответствующим зависимостям.

На основе вычисленных по формуле (1) расходов воды строится кривая расхода для диапазона экстраполяции.

### **Метод оптимальной экстраполяции относительных отклонений измеренных расходов воды от опорной кривой расходов**

В соответствии с рекомендациями, изложенными в [2], в качестве первого приближения к значению расхода воды принимается значение, полученное по аналитическому уравнению опорной кривой расхода для текущего уровня воды  $H_t$ . Для уточнения полученного по опорной кривой расхода воды используются поправки, которые вычисляются тем или иным способом экстраполяции характеристик изменения пропускной способности русла [4, 5].

В общем случае значение оперативного расхода воды на момент времени (срок)  $t$  вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{опт}} = Q(H_t)(1 + \tilde{q}_t), \quad (2)$$

где  $Q(H_t)$  – расход воды, полученный по опорной кривой расхода для уровня  $H_t$ , зафиксированного в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с;

$\tilde{q}_t$  – значение поправки, экстраполированное на момент времени  $t$ .

В качестве характеристик изменения пропускной способности русла во времени используются относительные отклонения ИРВ  $\tilde{q}_n$  от опорной зависимости  $Q(H)$ :

$$\tilde{q}_n = \frac{Q_n - Q(H_n)}{Q(H_n)}, \quad (3)$$

где  $Q_n$  – измеренный расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$Q(H_n)$  – расход воды, полученный по опорной кривой расхода для уровня  $H_n$ , зафиксированного во время измерения расхода воды  $Q_n$ , м<sup>3</sup>/с.

При нарушении однозначности связи  $Q(H)$  временной ряд относительных отклонений  $\tilde{q}(t)$  включает две составляющие:

– сигнал  $\tilde{q}_s(t)$ , отражающий изменения гидравлико-морфологических условий протекания потока (при вычислении ЕРВ должна учитываться лишь эта составляющая);

– белый шум  $\tilde{q}_N(t)$ , обусловленный случайными погрешностями измерения расходов воды [6, 7] (для исключения этой составляющей используется метод оптимальной экстраполяции, в формулы для вычисления весовых коэффициентов которого входит мера погрешности измерения  $\eta$  [2, 7, 8]).

Для применения метода оптимальной экстраполяции требуется надежная оценка статистических характеристик процесса  $\tilde{q}(t)$  (автокорреляционной функции и дисперсии). Такая оценка выполняется по данным прошлых лет.

На основе анализа хронологических графиков относительных отклонений установлено [4, 5, 9, 10], что изменение характеристик пропускной способности русла во времени, как правило, принимает циклический (квазициклический) характер, образуя полные или частичные реализации цикла за период нарушения однозначности связи  $Q(H) T_n$ . В некоторых случаях хронологический ход относительных отклонений  $\tilde{q}(t)$  можно представить в виде косинусоиды. Нормированная автокорреляционная функция случайного процесса относительных отклонений  $\tilde{q}(t)$  в таком случае может быть представлена в виде тригонометрической функции. Это позволяет оценить значения корреляционной связанности во времени характеристик пропускной способности русла и использовать их для экстраполяции значений поправок  $\tilde{q}_t$  [2, 4, 5, 9, 10].

Представление автокорреляционной функции для оперативного учета стока в условиях неустановившегося движения потока в виде тригонометрической может использоваться только при наличии одиночной паводочной петли, возникающей при прохождении волны половодья [10]. В случае множественных паводочных петель, как в рассматриваемом примере, решено использовать аппроксимацию автокорреляционной функции экспоненциальной зависимостью. Из всех имеющихся данных наблюдений были выделены периоды неустановившегося движения потока с наиболее полными и равномерными измерениями расходов воды. На основе этих данных получены зависимости, имеющие вид:

$$r(\tau) = e^{-k\tau}, \quad (4)$$

где  $r(\tau)$  – значение АКФ для соответствующего параметра сдвига  $\tau$ .

$k$  – эмпирический коэффициент.

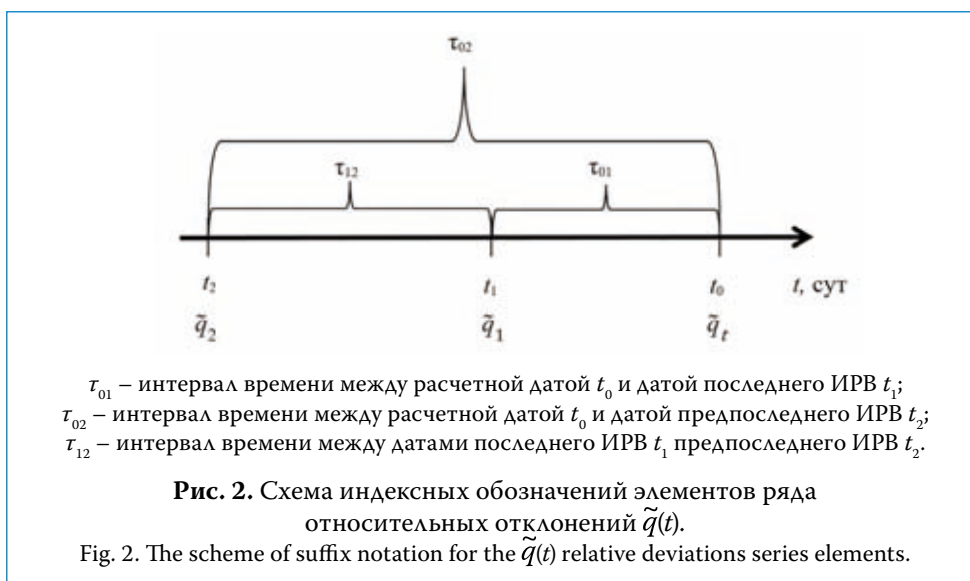
Значение  $\tilde{q}_t$  на любую дату в интервале от даты последнего измерения расхода воды до расчетной представляется в виде суммы взвешенных результатов относительных отклонений одного-двух последних ИРВ:

$$\tilde{q}_t = p_1 q_1 + p_2 q_2 + (1 - \sum_{i=1}^n p_i) m_{\tilde{q}}, \quad (5)$$

где  $p_i$  – весовые коэффициенты, которые вычисляются в зависимости от значений автокорреляционной функции и меры погрешности;

$m_{\tilde{q}}$  – оценка математического ожидания (среднего значения) ряда элементов  $\tilde{q}_i$ .

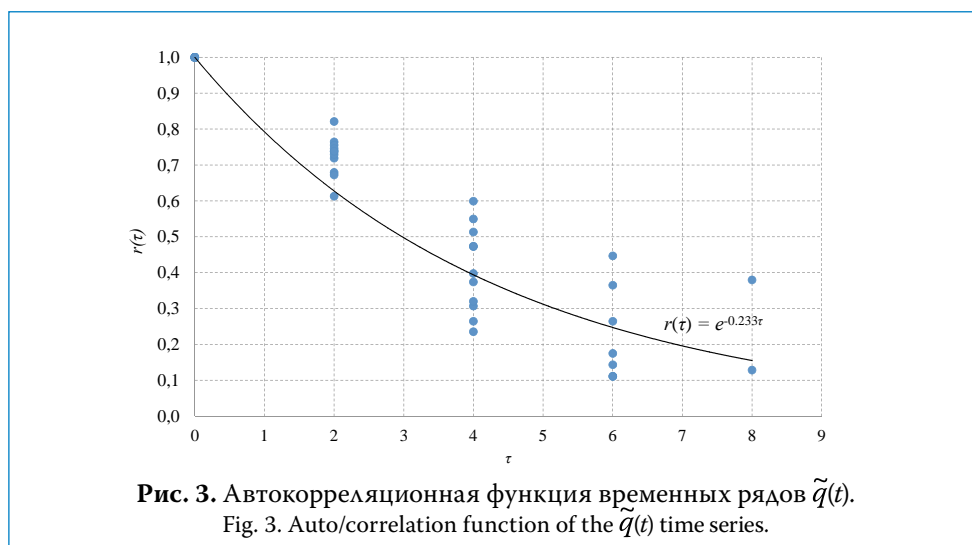
Схема индексных обозначений для временного ряда относительных отклонений  $\tilde{q}(t)$  и интервалов между измерениями в случае, когда в расчете используются результаты двух последних измерений расходов воды, представлена на рис. 2.



В качестве опорных кривых расхода для расчета по методу оптимальной экстраполяции использовали многолетние кривые расходов. Для получения опорных многолетних кривых расходов для каждого расчетного года были отобраны данные об ИРВ нескольких предшествующих лет. Параметры многолетних кривых расходов получены в программе «Речной сток». Для их аппроксимации использовали метод полиномиальной регрессии с заданием ограничения на значение функции в точке, соответствующей уровню воды ниже низшего наблюдаемого уровня.

Для экстраполяции расходов воды в диапазоне уровней воды 9,34–11,09 м применена формула (1). Зависимость площадей живого сечения русла от уровней воды строилась с учетом площадей, вычисленных на основе данных нивелировки профиля гидроствора до максимального исторического уровня воды.

Для получения автокорреляционной функции отобраны данные об ИРВ в течение нескольких паводков за весь имеющийся период наблюдений и вычислены относительные отклонения ИРВ от соответствующих годовых кривых расходов. Для каждого из отобранных паводков получены значения автокорреляционной функции, которые использовались для ее аппроксимации. Так, с целью расчета оперативных расходов воды по методу оптимальной экстраполяции за периоды неустановившегося движения 2016 г. была получена автокорреляционная функция по данным нескольких паводков периода с 2001 по 2015 гг. (рис. 3).



**Рис. 3.** Автокорреляционная функция временных рядов  $\tilde{q}(t)$ .  
Fig. 3. Auto/correlation function of the  $\tilde{q}(t)$  time series.

Для вычисления меры погрешности использовались относительные отклонения ИРВ (3) за периоды паводков лет, включенных в расчет параметров многолетних кривых расходов, от опорной многолетней кривой расхода.

Для расчета оперативных расходов воды в периоды половодья, когда отсутствовали ИРВ, применяли непосредственно многолетние кривые расходов. В периоды паводков при наличии ИРВ для расчета оперативных расходов использовали формулу (2), поправки  $\tilde{q}_t$  в которой вычисляли методом оптимальной экстраполяции по формуле (5).

### Метод оптимизации параметров формулы Джонса

Для расчета расходов воды при неустановившемся движении потока может использоваться формула Джонса [1, 11]:

$$Q_n = Q_y \sqrt{1 + \frac{1}{iC} \frac{\Delta H}{\Delta t}}, \quad (6)$$

где  $Q_n$  – расход воды при неустановившемся движении потока, м<sup>3</sup>/с;

$Q_y$  – расход воды при установившемся движении потока, м<sup>3</sup>/с;

$i$  – уклон свободной поверхности воды при установившемся движении потока;

$\Delta H/\Delta t$  – интенсивность изменения уровня воды за принятый интервал времени (м/сут);

$C$  – скорость добегания расхода установившегося движения (скорость, с которой распространяется граница установившегося движения с данным расходом  $Q_y$ ).



Второй способ расчета оперативных расходов воды основан на использовании формулы Джонса, параметры которой могут быть определены с помощью инструмента оптимизации на основе метода обобщенного приведенного градиента.

В работе [12] формула (6) применена для расчета расходов воды р. Чаттагучи (США) при прохождении волны попуска [13]. Расход воды при установившемся движении потока ( $Q_y$ ) рассчитывается по уравнению, аналогичному параболе Глушкова [2]. Параметр  $1/(iC)$  в формуле (6) авторы работы [12] предлагают принять постоянной величиной на весь период неустановившегося движения потока, что допустимо, если пренебречь расплыванием волны на протяжении небольшого участка. Такая волна называется моноклиальной [14]. Расчетная формула имеет вид:

$$Q_n = a_0(H - H_0)^{a_1} \sqrt{1 + x \frac{\Delta H}{\Delta t}}, \quad (7)$$

где  $x = 1/(iC)$ .

Четыре параметра в формуле (7) –  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $H_0$  и  $x$  – авторами работы [12] были определены с использованием нелинейных подходов к оптимизации на основе обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Для решения задач оптимизации используются специализированные пакеты прикладных программ. Высокая эффективность применения алгоритма объясняется интеграцией программы оптимизации и табличного документа. Суть оптимизации на основе метода ОПГ состоит в нахождении максимума или минимума некоторой заданной целевой функции путем изменения параметров, от которых она зависит, при введении некоторых ограничивающих условий [15].

В нашем исследовании подход, предложенный авторами работы [12], адаптирован для расчета оперативных расходов воды за период неустановившегося движения потока, вызванного прохождением волн половодий и паводков. Представление связи  $Q(H)$  в виде параболы Глушкова не всегда позволяет получить ее надежную аппроксимацию во всем диапазоне наблюдаемых уровней воды [2]. В связи с этим для расчета  $Q_y$  в формуле (6) использовали полиномиальную зависимость [2]. Таким образом, расчетная формула в данном исследовании принимает вид:

$$Q_n = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_m H^m \sqrt{1 + x \frac{\Delta H}{\Delta t}}, \quad (8)$$

где  $a_0, \dots, a_m$  – параметры уравнения регрессии расходов по уровням воды в форме полиномиальной зависимости.

Параметры  $a_0, \dots, a_m$  и  $x$  в формуле (8) определяются с использованием нелинейных подходов к оптимизации на основе ОПГ.

Для расчета параметров формулы (8) по данным предшествующих лет подготовлены электронные таблицы, куда были занесены отобранные данные об ИРВ и уровнях воды при измерениях расходов, а также сведения об интенсивности изменения уровней воды. В качестве интервала  $\Delta t$  в (8) принят интервал 1 сут. Для расчета  $\Delta H$  использовали срочные уровни воды на 8 ч суток, когда произошло измерение расхода и предшествующих суток. В расчеты также были включены ИРВ периодов межени. На даты этих ИРВ формула (8) принимала вид уравнения однозначной кривой расхода без учета эффекта неустановившегося движения.

При расчете оптимальных параметров формулы (8) для каждого исследуемого периода составляли электронную таблицу (табл. 1). Ячейки, выделенные серым цветом в табл. 1, заполняли в результате подбора оптимальных параметров (8) с помощью инструмента «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ».

**Таблица 1.** Подбор оптимальных параметров формулы Джонса с помощью инструмента оптимизации на основе метода ОПГ  
Table 1. The choice of the Jones formula optimal parameters with the use of the optimization tool based on the OPG method

Вид кривой расхода установленногo движения потока	Параметры формулы Джонса					
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$x$
Полином 2 степени						
Полином 3 степени						
Полином 4 степени						

В качестве целевой функции принята сумма квадратов разностей ИРВ и расходов, вычисленных на даты ИРВ по формуле (8):

$$Ssq_{min} = \sum_{i=1}^N [Q_{ni} - Q_{pi}]^2, \quad (9)$$

где  $Q_{ni}$  – измеренный расход на дату  $i$ ;

$Q_{pi}$  – расход воды, вычисленный на дату  $i$  по формуле (8);

$N$  – количество используемых ИРВ.

Целевую функцию (9) оптимизировали до достижения минимального значения путем изменения значений в ячейках, соответствующих параметрам формулы (8). Инструмент «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ» позволяет задавать ограничения на значения в ячейках, от которых зависит величина целевой функции (9). При помощи таких ограничений становится возможным получение зависимости, которая наибо-

лее точно аппроксимирует ИРВ. В нашем случае были введены следующие ограничения:

1. Для всех зависимостей задавались ограничения в нижней точке:

$$Q(H_{\min \text{ усл}}) = 0, \quad (10)$$

где  $H_{\min \text{ усл}}$  – условное значение уровня ниже низшего наблюдаемого уровня воды.

2. Для полиномов 3 и 4 степеней задавалось условие выпуклости функций для диапазона уровней воды от  $H_{\min \text{ усл}}$  до  $H_{\max \text{ изм}}$ :

$$a_0 + a_1 \frac{(H_i + H_{i-1})}{2} + \dots + a_m \left( \frac{(H_i + H_{i-1})}{2} \right)^m \leq \frac{(a_0 + a_1 H_i + \dots + a_m H_i^m) + (a_0 + a_1 H_{i-1} + \dots + a_m H_{i-1}^m)}{2}, \quad (11)$$

где  $H_i$  – уровень воды;

$H_{i-1}$  – уровень воды на 10 см ниже  $H_i$ .

3. Для значения параметра  $x$  было установлено условие устойчивости:

$$x \leq \min |1/(\Delta H/\Delta t)|. \quad (12)$$

Из трех полученных групп параметров формулы (8) для дальнейших расчетов выбиралась та, при которой целевая функция (9) оказывалась минимальной и/или была физически обоснованной на всем диапазоне уровней воды.

Экстраполяция зависимостей расходов от уровней воды в диапазоне уровней воды 9,34–11,09 м осуществлялась в два этапа. Расходы воды в диапазоне экстраполяции вычисляли по формуле (1) для реальных значений средних суточных уровней воды в период с 24 июня по 8 июля 2004 г., когда наблюдался максимальный исторический паводок, и для 11,09 м. Однако формула (1) позволяет получить только однозначную кривую расхода. Стояла задача экстраполировать петлеобразную связь расходов и уровней. С этой целью были получены значения  $\Delta H$  для суточных интервалов. Для вычисления экстраполированных расходов периода неустановившегося движения использовали следующую формулу:

$$Q_3 = Q_i (\omega_3 / \omega_i)^m \sqrt{1 + x \frac{\Delta H}{\Delta t}}, \quad (13)$$

где  $x$  – параметр, полученный на предыдущем этапе для диапазона уровней, в пределах которого производились измерения расходов воды.

На основе полученных значений  $H_{\text{средн}}$ ,  $Q_3$  и  $\Delta H$  при помощи инструмента «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ» определялись наиболее оптимальные параметры формулы (8) для диапазона уровней воды, в пределах которого не были произведены измерения расходов воды (9,34–11,09 м). В качестве целевой функции была принята сумма квадратов разностей вычисленных по формуле (13) экстраполированных расходов воды и расходов,

определенных для средних суточных уровней периода с 24 июня по 8 июля 2004 г. по формуле (8) с новыми параметрами:

$$Ssq_{min} = \sum_{i=1}^N [Q_{zi} - Q_{pi}]^2, \quad (14)$$

где  $Q_{zi}$  – экстраполированный расход на дату  $i$ ;

$Q_{pi}$  – расход воды, вычисленный на дату  $i$  по формуле (8);

$N$  – количество используемых ИРВ.

При этом были введены следующие ограничения:

1. Для всех зависимостей задавались ограничения в нижней точке:

$$Q(H_{maxизм}) = Q_{maxосв}, \quad (15)$$

где  $H_{maxизм}$  – максимальное значение уровня воды при измерениях расходов;

$Q_{maxосв}$  – расход воды, вычисленный для  $H_{maxизм}$  по выбранному аналитическому уравнению для диапазона уровней, в пределах которого производились измерения расходов воды.

2. Для полиномов 3 и 4 степеней задавалось условие выпуклости функций (11) для диапазона уровней воды от  $H_{maxизм}$  до МИУВ.

3. Для значения параметра  $x$  было установлено условие устойчивости (12).

Из трех полученных групп параметров формулы (8) для дальнейших расчетов выбиралась та, при которой целевая функция (14) оказывалась минимальной. Полученные формулы (8) для двух диапазонов уровней воды использовали для расчета оперативных расходов воды расчетного периода на каждый срок измерения уровней.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью сравнения результатов расчета оперативных расходов воды с режимными данными выполнен расчет средних суточных оперативных расходов воды по методу оптимальной экстраполяции и по формуле Джонса. При наличии двусрочных измерений уровней (8 ч и 20 ч) среднее суточное значение расхода определялось как среднее арифметическое из значений оперативных расходов воды, вычисленных на эти сроки. При значительных суточных колебаниях и наличии более двух сроков измерений уровней воды среднесуточное значение расхода вычисляли как среднее взвешенное по времени значение, полученное из срочных значений расходов воды по формуле:

$$Q_{ст} = [(Q_1+Q_2) \cdot (T_2-T_1)/2 + (Q_2+Q_3) \cdot (T_3-T_2)/2 + \dots + (Q_{(n-1)}+Q_n) \cdot (T_n-T_{(n-1)})/2] / (T_n-T_1), \quad (16)$$

где  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – сроки, для которых вычислены срочные оперативные расходы воды, следующие в течение суток в хронологически возрастающем порядке;

$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – значения расхода воды в сроки  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , м<sup>3</sup>/с.

Оценка эффективности предлагаемых методов оперативного учета речного стока в условиях неустановившегося движения потока выполнена на основе сравнения вычисленных двумя способами ЕРВ с режимными ЕРВ, опубликованными в справочниках Водного кадастра «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (ЕДС).

Случайная составляющая расхождений оперативных и режимных ЕРВ определена как среднеквадратическое значение ряда расхождений за весь период неустановившегося движения потока по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_{ont}^2}{N-1}}, \quad (17)$$

где  $N$  – количество членов ряда.

Систематические составляющие расхождений оперативных и режимных ЕРВ вычисляли как средние значения по всей совокупности относительных расхождений за расчетный период:

$$\delta_{cp} = \sum_{i=1}^n \delta_{ont}. \quad (18)$$

Максимальные по модулю значения относительных оперативных расходов ЕРВ и режимных ЕРВ определяли по формуле:

$$\delta_{max} = \max \left| \frac{Q_{ont} - Q_{режt}}{Q_{режt}} \cdot 100\% \right|, \quad (19)$$

где  $Q_{ont}$  – средний суточный оперативный расход на дату  $t$ ;

$Q_{режt}$  – режимный расход на дату  $t$  из таблиц ЕРВ, опубликованных в ЕДС.

Наибольшие расхождения при расчете по методу оптимальной экстраполяции выявлены в периоды, когда подъем уровней воды сопровождался ледовыми явлениями. В этот период измерения расходов воды невозможны, поэтому расчет осуществлялся непосредственно по опорной МКР. При расчете по формуле Джонса расхождения выявлены только в самом начале подъема уровней, когда степень влияния ледовых явлений еще велика. Для расчета оперативных расходов воды в такие периоды следует использовать методику, основанную на учете данных о среднесуточной температуре воздуха [16]. Также расхождения расчетов по обоим методам с данными ЕДС наблюдались в периоды максимальных подъемов уровней воды для некоторых паводков, что может быть связано с недостаточно корректной экстраполяцией годовых кривых расхода при расчете ЕРВ, помещенных в ЕДС.

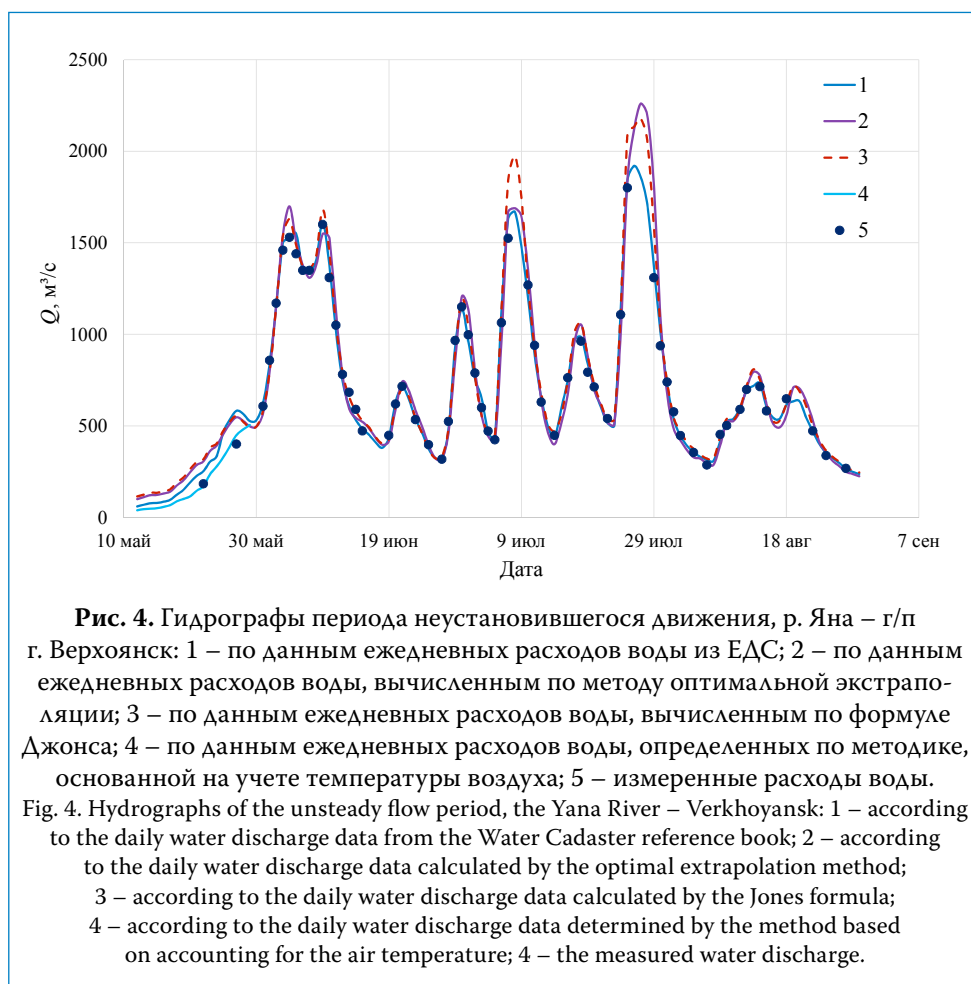
В табл. 2 представлены результаты оценки эффективности исследованных методов оперативного учета стока. В оценку не включены начальные периоды весеннего подъема уровней воды, поскольку в эти периоды целесообразно использовать другой метод [16].

**Таблица 2.** Результаты оценки расхождений расчета средних суточных оперативных расходов воды, рассчитанных по предлагаемым методам, с режимными расходами воды из ЕДС

Table 2. The results of assessment of discrepancies between average daily operational water discharge calculated by the proposed methods and the regime water discharge from the Water Cadaster reference book

Год	Метод					
	Оптимальная экстраполяция $\tilde{q}$			Формула Джонса		
	$\sigma$	$\delta_{cp}, \%$	$\max  \delta_{ont} $	$\sigma$	$\delta_{cp}, \%$	$\max  \delta_{ont} $
2012	7,0	1,6	23,7	5,8	2,1	14,8
2013	11,2	0,3	40,0	13,9	7,3	28,7
2014	7,4	-2,9	13,5	5,0	1,7	10,4
2015	6,3	0,0	17,4	6,0	2,1	18,2
2016	8,6	0,8	32,4	6,8	3,5	20,3
2017	6,0	-0,7	18,9	14,4	10,6	34,0
2018	11,4	2,7	28,5	9,7	3,2	21,3
2019	7,1	-2,1	18,7	7,5	3,9	14,4

На рис. 4 представлены гидрографы периода неустановившегося движения 2016 г. на р. Яна в гидростворе г/п г. Верхоянска. Начало весеннего подъема уровней воды с 12 по 29 мая сопровождалось ледовыми явлениями. Гидрографы, построенные по данным о расходах воды, вычисленным по двум предлагаемым в настоящем исследовании методам, достаточно близко соответствуют ИРВ, за исключением начального периода (до 30 мая), когда подъем уровней воды сопровождался ледовыми явлениями. В этот период наиболее близкий к ИРВ результат показал расчет по методике, основанной на учете среднесуточных температур воздуха [16]. Из рис. 4 также следует, что максимальные расходы воды паводков № 4 и № 6, вычисленные по формуле Джонса, превысили максимальные расходы воды из ЕДС на 20 %. Максимальные расходы воды паводка № 6, определенные по методу оптимальной экстраполяции, превысили максимальные расходы воды из ЕДС



на 30 %. В эти периоды уровни превысили диапазон, в пределах которого производились измерения расходов воды, по которым строилась опорная МКР. Расчет оперативных расходов воды осуществлялся на основе экстраполированной МКР. Полученные результаты могут свидетельствовать о некорректной экстраполяции годовой кривой расхода при расчете ЕРВ, помещенных в ЕДС.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод оптимальной экстраполяции рекомендован [2] для расчета оперативных расходов воды в различных условиях нарушения однозначности связи  $Q(H)$ , однако случай наличия множественных паводочных петель представлял определенную сложность вследствие трудности

определения АКФ. Предложенный способ получения АКФ по данным измерений во время периодов неустановившегося движения прошлых лет и представления АКФ в виде экспоненциальной зависимости позволяет применять метод оптимальной экстраполяции для расчета оперативных расходов в гидростворах рек с резко выраженным неустановившимся движением потока.

Несмотря на то что формула Джонса (6) рекомендована руководством по гидрологической практике ВМО [11], ее использование не получило широкого распространения в российской гидрологической практике. Это связано с тем, что в формулу входит параметр уклона водной поверхности, практически не измеряемый на гидрологической сети Росгидромета или измеряемый со значительными погрешностями. Рассмотренный в исследовании подход позволяет избежать непосредственного измерения уклона и определять параметры формулы Джонса на основе имеющихся данных измерений уровней и расходов воды. Исследование было проведено на основе реальных данных измерений на гидрологических постах, что позволило рассмотреть возможность применения данного подхода для расчета оперативных расходов воды в периоды прохождения волн половодий и паводков.

Исследования показали, что каждый из использованных методов имеет свои достоинства и недостатки и может применяться для вычисления оперативных расходов воды в период неустановившегося движения потока. Метод оптимальной экстраполяции позволяет экстраполировать изменчивость характеристик пропускной способности русла на период до следующего измерения расхода, однако этот метод неприменим в периоды, когда измеренные расходы воды отсутствуют. Метод, основанный на использовании формулы Джонса, параметры которой получены по данным измерений прошлых лет, не требует измеренных расходов воды в расчетном периоде. Это позволяет применять данный метод для расчета оперативных расходов воды в периоды половодий/паводков, когда измеренные расходы по каким-либо причинам отсутствуют.

Поскольку для оперативного учета стока характерна неопределенность характеристик пропускной способности русла, важность регулярных и надежных измерений расходов воды несомненна. Таким образом, для оперативного учета стока в периоды неустановившегося движения при наличии надежных измеренных расходов воды рекомендуется применять метод оптимальной экстраполяции. В периоды неустановившегося движения, когда измеренные расходы отсутствуют (например, период ледохода), рекомендуется использовать формулу Джонса.



Представленные в исследовании методики оперативного учета речного стока в условиях неустановившегося движения потока могут быть включены как дополнения в методические рекомендации «Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
2. Р 52.08.872-2018. Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды. Введ. 22.02.2018. ФГБУ ГГИ, 2018. 107 с.
3. Наставление гидрологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. III: Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 292 с.
4. *Карасев И.Ф., Яковлева Т.И.* Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока // Доклады VI Всерос. гидролог. съезда. М.: Росгидромет, 2006. С. 156–163.
5. *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.
6. *Поляк И.И.* Модели «сигнал плюс шум» и осреднение по пространству временных рядов // Метеорология и гидрология. 1985. № 9. С. 46–53.
7. *Яковлева Т.И.* Оценка изменчивости пропускной способности русла на основе модели «сигнал плюс шум» // Вопросы гидрологии суши. 1991. С. 209–214.
8. *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.
9. *Шарина Ю.В.* Методика оперативного учета стока в условиях зарастания русла (на примере реки Матыра в створе села Крутое) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 2. С. 73–92. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-2-6.
10. *Шарина Ю.В.* Оперативный учет речного стока в условиях неустановившегося движения и переменного подпора (на примере г/п р. Урал – г. Оренбург) // Труды II Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: Химиздат, 2018. С. 697–700.
11. Manual on Stream Gauging. Volume II. Computation of Discharge. World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
12. *Zakwan M.* Spreadsheet-based modelling of hysteresis-affected curves / Applied Water Science. No. 8, 2018. Article number: 101.
13. *Faye R.E., Cherry R.N.* Channel and Dynamic Flow Characteristics of the Chattahoochee River, Buford Dam to Georgia Highway 141 / Geological survey water-supply paper. United States Government printing office, Washington: 1980. 66 p.

14. Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 337 с.
15. Шадрина Н.И., Берман Н.Д. Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2016. 102 с.
16. Шарина Ю.В. Оперативный учет стока рек при наличии ледяных образований // Труды III Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»: сб. СПб.: Химиздат, 2019. С. 967–971.

**Сведения об авторе:**

Изьюрова Юлия Валерьевна, научный сотрудник, отдел гидрометрии и гидрологической сети, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), 199053, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: yulia.hydrologist@yandex.ru

*Для цитирования:* Оперативный учет речного стока в условиях неустановившегося движения потока (на примере реки Яна в гидростворе города Верхоянска) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 51-70. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-3.

---

**THE REAL-TIME WATER DISCHARGE COMPUTATION IN THE CONDITIONS OF UNSTEADY FLOW (THE YANA RIVER IN THE VERKHOYANSK GAGING SECTION AS A STUDY CASE)**

**Yulia V. Izyurova**

E-mail: yulia.hydrologist@yandex.ru

*State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia*

**Abstract:** The real-time water discharge computation involves practical real-time computation of water discharge values to ensure forecasting and preventing dangerous hydrological phenomena, as well as daily monitoring of river water content and information support for the functioning of water management facilities in river basins. Nowadays the task of the real-time discharge accounting is very relevant.

The article presents the outcomes of the study of two methods of computation of the real-time water discharges in the conditions of the unsteady flow that enable to pass to automatic operative accounting of the river flow. The first method is based on using of optimal extrapolation of the relative deviations of the measured water discharges from the reference rating curve obtained from the data of water discharge measurements for previous years. The second method is a new approach based on the Jones formula. The parameters of the Jones formula were obtained from measurements of water discharge over the past years using an optimization tool based on the generalized reduced gradient method. The daily real-time water discharges calculated in two ways were compared with the daily water discharges published in the reference books of the water cadaster «Daily data on the regime and resources of land surface waters». As a result, it was found that both methods can be used for automated real-time water discharge computation in conditions of unsteady flow.

**Keywords:** real-time water discharge computation, discharge curve, unsteady flow, loop curve, high water, flood, daily water discharges.

**About the author:**

Yulia V. Izyurova, Researcher, Department of Hydrometry and Hydrological Network, State Hydrological Institute; 2nd line of Vasilyevsky Island, 23, St. Petersburg, 199053, Russian Federation; e-mail: yulia.hydrologist@yandex.ru

**For citation:** Izyurova Y.V. *The Real-time Water Discharge Computation in the Conditions of Unsteady Flow (the Yana River in the Verkhoyansk Gaging Section as a Study Case)*// *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 3. P. 51-70. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-3.

**REFERENCES**

1. Karasev I.F. *Rechnaia gidrometriya i uchet vodnykh resursov* [River hydrometry and accounting of water resources]. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 310 p.
2. R 52.08.872-2018 *Operativnyi uchet stoka na vodotokakh. Metody obrabotki nabliudeniya za urovnyami i raskhodami vody* [Real-time accounting of discharge in watercourses. Methods of processing the outcomes of observations of water levels and discharge]. Vved. 22.02.2018. FGBU «GGI», 2018. 107 p.
3. *Nastavlenie gidrologicheskim stantsiiam i postam* [Instructions for hydrological stations and posts]. Vyp. 6. Ch. III: *Costavlenie i podgotovka k pechati gidrologicheskogo ezhegodnika*. L.: Gidrometeoizdat, 1958. 292 p.
4. Karasev I.F., Yakovleva T.I. *Usovershenstvovaniye metody gidrometricheskogo ucheta stoka* [The improved methods of the discharge hydrometric accounting] // *Doklady VI Vseros. gidrolog. syezda*. M.: Rosgidromet, 2006. Pp. 156–163.
5. Yakovleva T.I. *Usovershenstvovanie i adaptatsiya modeli gidrometricheskogo ucheta stoka pri neodnoznachnykh zavisimostiakh raskhodov ot urovnei vody* [Improvement and adaptation of the models of hydrometric accounting of discharge in case of ambiguous dependencies of discharges on the water level]// *Sbornik rabot po gidrologiyi GGI*. 2003. № 26. Pp. 58–69.
6. Polyak I.I. *Modeli «signal plus shum» i osrednenie po prostranstvu vremennykh riadov* [“Signal plus noise” models and averaging according to the time series space]// *Meteorologiya i gidrologiya*. 1985. № 9. p. 46–53.
7. Yakovleva T.I. *Otsenka izmenchivosti propusknoi sposobnosti rusla na osnove modeli «signal plus shum»* [Assessment of the bed passage ability variability based on the “signal plus noise” model] // *Voprosy gidrologiyi sushy*. 1991. P. 209–214.
8. Karasev I.F., Yakovleva T.I. *Ekstrapoliatsionno-analiticheskii metod operativnogo ucheta stoka rek s neustoichivym ruslom (na primere r. Amudar'i)* [An exponential /analytical method of the real-time accounting of the flow of the rivers with an unsteady bed (the Amudarya River as a study case)] / *Tr. GGI*. 1988. Vyp. 325. P. 19–30.
9. Sharina Y.V. *Metodika operativnogo ucheta stoka v usloviakh zarastaniya rusla (na primere reki Matyra v tvore sela Krutoe)* [The method of real-time discharge accounting in the conditions of the bed overgrowing (the Matyra River in the range of the village of Krutoe as a study case)]// *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2017. № 2. P. 73–92. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-2-6.
10. Sharina Y.V. *Operativnyi uchet rechnogo stoka v usloviakh neustanovivshegosya dvizheniya i peremennogo podpora (na primere GP r. Ural – g. Orenburg)* [Real-time accounting of river discharge in the conditions of unsteady movement and variable backwater (the Ural River at Orenburg as a study case)]// *Trudy II Vserossiyskoy konferentsiyi «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya»*: sb. SPb.: Khimizdat, 2018. P. 697–700.

11. Manual on Stream Gauging. Volume II. Computation of Discharge. World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
12. *Zakwan M.* Spreadsheet-based modelling of hysteresis-affected curves / *Applied Water Science*. No. 8, 2018. Article number: 101.
13. *Faye R.E., Cherry R.N.* Channel and Dynamic Flow Characteristics of the Chattahoochee River, Buford Dam to Georgia Highway 141 / Geological survey water-supply paper. United States Government printing office, Washington: 1980. 66 p.
14. *Grushevskii M.S.* Volny popuskov i pavodkov v rekakh [Waves of releases and floods in rivers]. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 337 p.
15. *Shadrina N.I., Berman N.D.* Reshenie zadach optimizatsii v Microsoft Excel 2010 [Solution of optimization tasks in Microsoft Excel 2010]. Khabarovsk: Izdatel'stvo TOGU, 2016. 102 p.
16. *Sharina Y.V.* Operativnyi uchet stoka rek pri nalichii ledianykh obrazovaniy [Real-time accounting of the river flow in case of ice formations]// Trudy III Vserossiiskoi konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya»: sb. SPb.: Khimizdat, 2019. P. 967–971.