

развіцця: тэзісы дакл. III Міжнар. навук. канф., Брэст, 7–9 чэрв. 2006 г. / Академия, рэдкал.: М.В. Міхальчук (адк. рэд.), [і інш.]. – Брэст, 2006. – С. 219.

15 Логинов, В.Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.

16 Волчек, А.А. Изменение сроков наступления максимальных расходов воды весеннего половодья на реках Беларуси / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек // Вест. Фонда фундамент. исслед. – 2008. – № 1. – С. 54–59.

17 Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеиздат. – Т. 5. – ч. 1., 1966. – 718 с.

18 Волчек, А.А. Изменение дат наступления пиков половодий на реках Беларуси / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек // Географические проблемы сбалансированного развития староосвоенных регионов: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Брянск, 25 – 27 окт. 2007 г. / РИО БГУ; редкол.: Л.М. Ахромеев [и др.]. – Брянск, 2007. – С. 163–168.

19 Волчек, А.А. Трансформация дат наступления максимальных расходов воды весеннего половодья на реках Беларуси / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек // Региональные проблемы экологии: пути решения: материалы IV междунар. экологического симпозиума, Полоцк, 26 – 27 нояб. 2007 г.: в 3 т. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2007. – Т. I. – С. 64–68.

## УДК 556.18

*Волчек А. А., д-р геогр. наук, профессор, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «БрГТУ», г. Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by*

*Мешик О. П., канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой природообустройства, e-mail: omeshik@mail.ru*

*Шешко Н. Н., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры природообустройства, УО «БрГТУ», г. Брест, Беларусь, e-mail: optimum@tut.byг. Брест, РБ*

### СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА НА ПРИМЕРЕ Р. ЯСЕЛЬДА

*Аннотация.* В статье выполнен обзор подходов для определения предельной нагрузки на водные экосистемы. Предложен способ модификации существующих методов расчета экологического стока на основе переноса обеспеченностей. Выполнен сопоставительный анализ величины экологического стока с применением различных подходов на примере р. Ясельда

#### Введение

Водопотребление Республики Беларусь из поверхностных источников (рек и проточных водохранилищ) составляет более 40 % от общего объема водопотребления [1]. Основное направление использования поверхностных вод это промышленное водоснабжение, рыбное и прудовое хозяйство, и в незначительной степени орошение. При этом в условиях пересмотра природоохранной идеологии требуется всесторонняя оценка предельно допустимой нагрузки на водотоки. Усложняет ситуации оценки данной нагрузки современное глобальное изменение климатических условий.

Река является природным объектом, геосистема которой формировалась продолжительный период времени. За это время сформировалось оптимальное соотношение количества и разнообразности биологических видов. Поэтому изменения

внутри годового стока может приводить к изменению биоразнообразия. Предельный объем изъятия водных ресурсов принято определять на основе экологического стока.

Разработка методов оценки экологического стока начата уже давно. Первые методы оценки обязательного для пропуска стока появились в 1940-х годах в США. Они были нацелены на определение минимального объема стока обеспечивающего существование ихтиофауны. С возрастанием воздействия обвалований, спрямлений и регулирования стока на биоценозы разработаны более 200 методов оценки минимально допустимого стока [17]. Все методы можно разделить на четыре группы: чисто гидрологические методы; методы оценки гидравлических показателей; гидробиологические методы и комплексные методы [17, 18, 21]. Отдельно стоит отметить крупную исследовательскую работу по оценке величины экологического стока для 128 наиболее крупных рек мира. В данном случае величина экологического стока вычислялась с применением модели WaterGAP2. Модель WaterGAP2 позволила вычислить на основе уравнений водно-энергетического баланса общий запас возобновляемых водных ресурсов. Экологический сток был определен как 20–50 % от общего запаса территории в возобновляемых водных ресурсах [20]. Однако такие упрощенные методы могут стать причиной сильных экологических последствий, так как изъятие до 50 % водных ресурсов бассейна приводит к деградации геосистемы водосбора. Кроме того, в статье [17] выполнен подробный анализ мировых подходов к оценке экологического стока. Подробно разобраны недочеты и достоинства существующих методов. К плюсам предложенного метода в работе [17] следует отнести возможность применения методики при отсутствии по данной реке наблюдений о связи величины стока с биологическим (экологическим) состоянием реки и прилегающей территории. Однако, в работе предлагается группировка рек по форме функции плотности распределения случайной величины, при этом в группы попадают как нарушенные так и не нарушенные водотоки. С нашей точки зрения правильнее выполнить статистическое восстановление естественного стока и только после этого выполнять группировку. А также, метод не дает возможности получить величину экологического стока для различных расчетных обеспеченностей. Это важно, так как практически все инженерные и управленческие задачи решаются на основе обеспеченных величин.

Рассмотрим различные требования, предъявляемые к экологическому стоку с позиции геоэкологии и гидробиологии. В общем случае, как указывалось в работе [7], экологически допустимый сток должен учитывать следующие факторы:

1. Объем стока должен обеспечивать нормальное развитие гидробионтов. Это достигается поддержанием скорости течения воды в диапазоне 0,25...0,6 м/с [1], а глубина потока не менее 0,1...3 м [13]. При этом минимальная глубина из диапазона соответствует межённому периоду летом и зимой. Однако при средней мощности лёдообразования от 17 до 45 см на юге до 29...64 см на севере и северо-востоке может наблюдаться гибель ихтиофауны [12].

Экологически допустимый сток должен учитывать [3]:

объем, необходимый для нормального развития гидробионтов. В этом случае требуется сохранять скорости течения воды в диапазоне: 0,25...0,6 м/с (0,25 м/с - нижний предел скоростного режима, при котором начинается бурное развитие фитопланктона) при глубине потока не менее 0,1...3 м [6]. Важным периодом с точки зрения средообразующих функция является межённые периоды лета и зимы;

выполнение рекой ее природных функций. Речная сеть транспортирует вещества и энергию, таким образом, перераспределяя их во времени и в пространстве;

внутригодовую изменчивость стока. Наличие изменчивости стока реки в течении года поддерживает естественную цикличность в развитии различных биологических видов;

изменчивость стока по годам. Как и внутригодовая изменчивость, колебания объемов стока по годам позволяет обогащать пойменную часть водотока питательными веществами. Одновременно затопление уничтожает гидрофобные растения заселяющие пойму за маловодный период.

В период активного развития промышленного производства прошлого века использовалось понятие минимального стока. Однако оно в большей степени было направленно учитывать потребности человека в водных ресурсах. Кроме того, минимальное количество воды поступающей в нижний бьеф было связано с наличием водопотребителей ниже по течению реки. Естественно с учетом современного мировоззрения такие предпосылки к оценке минимального стока являются не приемлемыми.

### Методы и расчетные зависимости

В настоящее время разработаны различные способы оценки величины экологического стока, которые условно объединены в четыре группы [7]. Рассмотрим их в отдельности.

#### Способ минимальных расходов

Как указывается в работе [1], размер минимального (экологического) стока принимается равным минимальному среднемесячному стоку 95 % обеспеченности. Кроме того, исходя из рекомендаций [5] объем экологического стока принимается в зависимости от вариации годового стока реки. При значительной изменчивости годового стока экологический сток может доходить по абсолютному значению до минимального годового стока. Учитывая класс (таблица 1), определяется экологический сток как доля от расчетной величины [13].

Таблица 1 Критерии определения экологического стока

Способ градации	Размер экологического стока	Способ градации	Размер экологического стока
$C_v < 0,25$	Минимальный месячный сток	Ручьи	3 % от минимального суточного стока
$C_v = 0,25 \dots 0,40$	Минимальный меженный сток	Малые реки	20 % от минимального суточного стока
$C_v > 0,40$	Минимальный годовой сток	Средние реки	75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности

В Беларуси размер экологического стока принимается как 75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности. В Украине оценка экологического стока производится по формуле

$$Q_{\text{эко}} = K \cdot Q_{\text{мин. мес.}} \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от класса реки и среднемноголетнего её стока (таблица 2).

Таблица 2 Зависимость коэффициента пропорциональности от класса реки

Размер водотока	Среднеголетний сток, м <sup>3</sup> /с	<i>K</i>
ручьи и малые реки	менее 10	0,3
Малые и средние реки	10...50	0,35
Средние реки	50...200	0,4
Крупные реки	Более 200	0,45

В Швейцарии величина экологического стока регламентирована размером площади водосбора [8], а точнее минимальным экологическим модулем стока

$$Q_{\text{эко}} = A \cdot q_{\text{эко}} \quad (2)$$

где  $q_{\text{эко}}$  – минимальный модуль стока, принимаемый равным 1 л/с на 1 км<sup>2</sup>;  $A$  – площадь водосбора реки, км<sup>2</sup>.

Данный подход не в полной мере соответствует выше перечисленным требованиям, а именно: не обеспечивает внутригодовую изменчивость стока, не учитывает многолетние циклы водности и в большинстве случаев не достигается минимальная скорость течения воды.

#### **Способ натуральных исследований**

Применения данного способа основано на выполнении полевых или лабораторных исследований. Способ наиболее часто применяется для важных с экологической точки зрения объектов. Сложность реализации его связана со значительными экономическими затратами, а также необходимостью проведения продолжительных непрерывных наблюдений. В настоящее время широкое распространение получили автономные автоматизированные пункты гидрологического мониторинга, накапливающие всю необходимую информацию для достоверной оценки размеров экологического стока. При этом реализуются все требования, предъявляемые к величине экологически обоснованного минимального стока реки.

Однако, как и в иных отраслях народного хозяйства, остается проблема оценки предельных антропогенных нагрузок (объемов сброса сточных вод, их химического состава и режима сброса) обеспечивающих условия существования и развития геосистем. Причем предельные экологически обоснованные характеристики водотока в каждом отдельном случае будут своими. Так, с точки зрения условий рыбного хозяйства, ключевым фактором будет являться количество кислорода растворенного в воде, при этом геолого-минералогические условия могут существенно влиять на количество кислорода.

Подобный способ определения экологического стока изложен в [19]. В документе подробно описаны основные существующие подходы к определению экологического стока, а также приведен подробный список методов применяемых в Европейских странах. При наличии данных наблюдений за состоянием экосистем речных бассейнов обоснование предельного стока определено достаточно четко. Однако в случае недостатка выше упомянутой информации для большинства стран ЕС экологический сток принимается постоянным в течение года, что противоречит приведенным принципам в [19], также раздела «Ведение» данной статьи. Также стоит отметить, что, как и в работе [17], так и в [19] не определены подходы к определению экологического стока при различных обеспеченностях.

### Способ повышения обеспеченности

Данный способ подразумевает выделение нижнего и верхнего предела изменения стока, практически встречающегося на реальной реке [14; 15]. Суть метода заключается в установлении нижнего предела экологически допустимого стока на уровне месячных расходов для года 99% обеспеченности, так как эти условия являются предельными с точки зрения природопользования. В большинстве случаев, при обеспеченности более 90 % на реках Беларуси не наблюдается затопления пойменной части, а если и происходит затопление, то оно носит местный характер, связанный с локальным рельефом.

В качестве верхнего предела принимается расход 50 % обеспеченности. В этих условиях формируется нормальный режим обмена веществом и энергией в пределах геосистемы река-пойма. Как указано в работе [7; 8] наибольшая продуктивность речных и пойменных экосистем наблюдается при обеспеченности в пределах 40...60 %.

Определение параметров функции распределения экологического стока основывается на переносе обеспеченности среднегодового стока к заранее определенным обеспеченностям экологического стока. А именно, предполагается, что экологический сток 95 % обеспеченности соответствует среднегодовому стоку 99 % обеспеченности, а экологический сток 25 % обеспеченности принимается равным стоку 50 % обеспеченности. Имея две точки кривой функции распределения случайной величины можно подобрать ее параметры. Однако применение данного подхода ограничивает диапазон применяемых теоретических кривых распределений (применимы только двух параметрические функции распределения). Кроме того, применение перехода  $99\% \Rightarrow 95\%$  и  $50\% \Rightarrow 25\%$  видится достаточно субъективным и не всегда может быть использовано в качестве проектного либо директивного. Как указано в работе [7], применение данного подхода наиболее эффективно для крупных межрегиональных рек. В условиях Беларуси, где составление водохозяйственного баланса нацелено в основном на малые или средние реки, применение этого метода не всегда эффективно и обоснованно.

### Способ пропорциональных расходов

Применение данного метода основано на пропорциональном выделении экологического стока как доли стока реки в текущий момент времени. В этом случае используется некий коэффициент пропорциональности  $K$  характерный для конкретных условий. С учетом коэффициента пропорциональности величина экологического стока  $Q_i^{\text{эко}}$  в  $i$ -тый интервал времени определится следующей зависимостью

$$Q_i^{\text{эко}} = Q_i \cdot K_i. \quad (3)$$

Применение данного подхода требует проведение натурных исследований с привлечением специалистов биологического направления. Широкое применение указанный подход получил в Западной Европе. К недостаткам можно отнести отсутствие обоснованных подходов к оценке коэффициентов пропорциональности в различных природных условиях. При условии разработки нормативных подходов к определению данного коэффициента рассматриваемый подход может быть эффективным.

Как описано в работе [8] в случае применения способа пропорциональных расходов в качестве минимального расхода реки необходимо принимать или среднемесячный расход для года 75 % или же среднегодовой расход 80...90 %.

Данные предпосылки основаны на анализе формы функции плотности распределения стока рек при различных значениях коэффициента вариации. Кроме того, выбор нижней границе продиктован особенностями формирования стока реки из таких источников как: поверхностный сток, грунтовый сток и грунтово-напорный. Предполагается, что минимальное значение стока реки будет достигнуто при отсутствии поверхностной и грунтовой составляющей, однако данное явление наблюдается крайне редко и не может рассматриваться как нижний предел экологически обоснованного стока реки [11].

Изменчивость стока в многолетнем разрезе должна обеспечиваться за счет цикличности в водности рек [4]. Таким образом, при разработке схемы управления водным режимом и составлении водохозяйственного баланса для водохранилищ многолетнего регулирования, предусматривать повышенные среднегодовые расходы не реже естественной цикличности.

Внутригодовая изменчивость стока реки является бесспорной необходимостью любой геосистемы имеющей в своей структуре водотоки с трансформированным водным режимом. Для обеспечения внутригодовой изменчивости рассматривают три основных сезона: зима, лето-осень, весна. В период летне-осенней межени в речной сети протекают активные биологические процессы, за данный период происходит наибольший прирост биомассы водной и прибрежной растительности. С точки зрения проектирования системы управления природопользованием в данных условиях индикатором продуктивности биоценозов будет являться глубина воды в реке (средняя глубина воды). В различных природных условиях оптимальная глубина реки с позиции максимальной продуктивности будет различной. Рассматривая результаты эксперимента, приведенного в работе [7], продуктивность фитоценозов будет иметь восходящую и нисходящую ветви. Нисходящая ветвь, связанная со значительным повышением глубины, для нас является менее интересной. Рассмотрим восходящую ветвь, обеспечение выживания растений достигается при расходах 90...95 % обеспеченности. Данные расходы приемлемы только для периода летне-осенней межени. В общем случае необходимо проводить натурные исследования на основе которых в расчетном створе составляется зависимость расхода реки от средней глубины потока. При этом может еще использоваться зависимость расхода реки от средней скорости потока. В настоящее время данные показатели широко используются в нормативной литературе. Например, при оценке предельно допустимого объема сброса сточных вод в водотоки. При наличии данных многолетних наблюдений в рассматриваемом створе задача реализуется достаточно просто. При отсутствии таковых, для построения зависимости расхода реки от средней глубины может быть использован способ, изложенный в работе [3]. В данном случае для оценки измеренного значения обеспеченности используются данные наблюдений за расходом рек аналогов или исходной реки в другом створе.

Сток реки в зимний период в первую очередь должен обеспечивать минимальное количество кислорода в воде и не допускать ее промерзания. Исходя из анализа графика функции плотности распределения расходов рек показал, что левая точка перегиба соответствует появлению поверхностного питания. Исходя из этого, значение расхода реки в левой точке перегиба функции плотности распределения может приниматься в качестве экологического стока в зимний период [8].

Экологический сток в весенний период определится исходя из предельной величины объема транспортируемых наносов. Условием нормального функционирования реки является баланс объемов частиц осажденных и перемещенных в низ по течению. Весенний период характеризуется значительным объемом воды и твердых частиц. Осажденные частицы за меженные периоды должны быть перемещены в низ по течению, иначе могут наблюдаться явления заиления. Заиление водотока приводит к снижению его глубины, что в свою очередь является неблагоприятным фактором развития геосистемы водотока.

Предельный объем весеннего стока определяется на основе натуральных наблюдений за мутностью в течение года. Предполагается, что объем весеннего стока должен быть не менее доли  $K_w$  от общего годового объема стока [7,16]

$$W_b = W_r \cdot K_w \quad (4)$$

где  $W_b$  – предельный объем стока за весенний период, м<sup>3</sup>;  $W_r$  – объем стока за весенний период, м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $K_w$  может определяться по следующей зависимости

$$K_w = \frac{\rho}{\rho + \rho_{пр}} \quad (5)$$

где  $\rho$  и  $\rho_{пр}$  – соответственно мутность воды за год в целом и за весенний период (предельная), г/м<sup>3</sup>.

Обобщая выше сказанное можно выделить способ пропорциональных расходов как наиболее развитый с точки зрения учета локальных особенностей реки и вероятностных характеристик стока. Однако данный подход не имеет широкого распространения и требует всесторонней проверки его эффективности на конкретных речных системах.

#### *Результаты исследований и их обсуждение*

Река Ясельда протекающая в Брестской области Республики Беларусь, относится по классификации к малым рекам. Однако протекая по достаточно промышленно развитым населенным пунктам (г. Береза, г. Белоозерск, г. Мотоль и т.д.). Кроме того, верховье реки имеет крупное водохранилище Селец, основное назначение которого это накопление водных ресурсов для обеспечения водоснабжения рыбхоза «Селец». Объем водопотребления рыбхоза составляет значительную часть объема стока реки в данном створе.

Выше сказанное подводит к необходимости обоснования предельных объемов стока для р. Ясельда. С позиции наибольших заборов воды рыбхозом «Селец» и сброса сточных вод в пределах города Береза, наиболее экологически напряженным можно рассматривать участок реки от створа водохранилища Селец до автомобильной дороги Брест–Минск–граница Российской Федерации (М1). Для данного участка и будем в дальнейшем анализировать параметры минимально допустимого (экологического) стока.

Наблюдения за стоком р. Ясельда велись на двух гидрометрических постах. С 1972 по 1991 гг. велись наблюдения на посту Хорева. Наблюдения на гидрометрическом посту р. Ясельда – г. Береза ведутся с 1929 года по настоящее время с перерывом в 11 лет (1934–1945 гг.).

Для уточнения стока р. Ясельда в створе водохранилища выполнены гидрологические исследования. Оценка расходов различной обеспеченности выполнялась по гидрометрическому посту р. Ясельда – г. Береза. Так как на

итоговый годовой сток в данном створе не оказывает значимого влияния водохранилище внутри сезонного регулирования, среднегодовой расход можно рассматривалась как естественный сток. При этом восстановление данных наблюдений не требуется и для анализа используется весь доступный ряд наблюдений (1945–2013 гг.). Анализ однородности подтвердил выдвинутую гипотезу. Таким образом, полученные значения среднегодового стока различной обеспеченности приведены в таблице 3.

Таблица 3 Расходы р. Ясельда различной обеспеченности

Расчетная обеспеченность, %	5	25	50	75	90	95	97	99
Среднегодовой сток р. Ясельда – г. Береза, Q, м <sup>3</sup> /с	7,63	5,50	4,42	3,57	3,00	2,71	2,55	2,30

Для переноса характеристик стока на исследуемый створ необходимо вычислить модули стока различной обеспеченностей. Основной характеристикой определяющей объем стока является площадь водосбора. Площадь водосбора в трех створах выполнялась на основе цифровой модели рельефа (DEM) и алгоритма анализа структуры поверхностного стока. В данном случае анализировался только поверхностный сток, так как в большинстве случаев для крупных водосборов грунтовый сток копирует поверхностный. Для работы алгоритма был выполнен анализ замкнутых локальных понижений рельефа. Выявленные локальные понижения «раскрывались» в направлении генерального рельефа. Таким образом, получена карта водосборных площадей (рисунок 1).



Рисунок 1 Карта площадей водосборов по основным створам

На основе вычисления геометрии водосборов получены значения их площадей. Площадь водосбора в створе Хорева составила 663 км<sup>2</sup>, в створе водохранилища 858 км<sup>2</sup>, в створе гидрометрического поста Береза 1131 км<sup>2</sup>. Полученные водоразделы анализировались на предмет переброски стока за счет мелиоративных каналов. Выделены несколько участков с незначительным изменением водораздела, однако суммарная площадь данных участков менее 0,5 % от площади водосбора данной реки в створе Хорева. Поэтому дальнейшие расчеты проводились с использованием

полученных площадей водосборов. Значения модулей стока в створах Хорева и Береза приведены в таблице 4. На основе них вычислен среднегодовой сток в створе рассматриваемого водохранилища.

Таблица 4 Расходы р. Ясельда различной обеспеченности в створе водохранилища

Обеспеченность, %	Среднегодовые расходы, м <sup>3</sup> /с		Модули стока, л/с на км <sup>2</sup>			Среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с
	Береза	Хорева	Береза	Хорева	Селец	Селец
5	7,63	5,02	6,742	7,930	6,742	5,78
25	5,50	3,92	4,863	6,193	4,863	4,17
50	4,42	3,27	3,908	5,166	3,908	3,35
75	3,57	2,69	3,156	4,250	3,156	2,71
90	3,00	2,25	2,648	3,555	2,648	2,27
95	2,71	2,02	2,396	3,191	2,396	2,06
97	2,55	1,87	2,255	2,954	2,255	1,93
99	2,30	1,62	2,034	2,559	2,034	1,74

Как видно из таблицы 4, модули стока по постам Береза и Хорева значительно отличаются, это связано с различиями в формировании стока. Река Ясельда в створе Хорева близка к малым рекам и имеет более высокие модули стока. В этой связи, для оценки стока в створе водохранилища в дальнейшем будем использовать данные наблюдений по гидрометрическому посту в г. Береза.

В соответствии со способом *минимальных расходов* определим экологический сток на основе данных таблицы 1. С учетом класса реки Ясельда относящейся к малым рекам, экологический сток составляет 20 % от минимального средне суточного стока. Анализ среднемесячных минимальных расходов позволил выявить изменения в особенностях формирования стока (рисунок 3) приходящийся на период введения в эксплуатацию водохранилища «Селец». Поэтому для дальнейшей работы по методу *минимальных расходов* будет использоваться период наблюдений 1945–1985 гг. Анализ эмпирической кривой распределения случайной величины минимальных среднемесячных расходов показала, что наиболее приемлемой теоретической кривой плотности распределения является кривая Крицкого-Менкеля (рисунок 4).

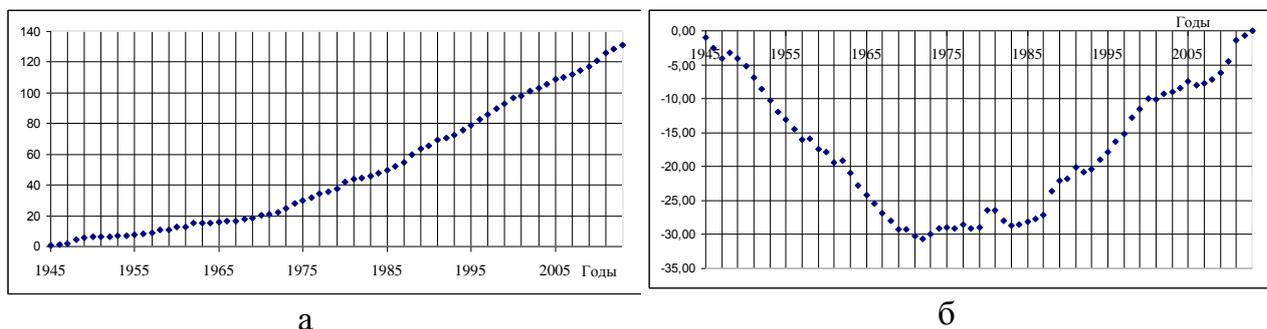


Рисунок 2. Интегральная (а) и интегрально-разностная (б) кривые среднемесячных минимальных расходов р. Ясельда г. Брест

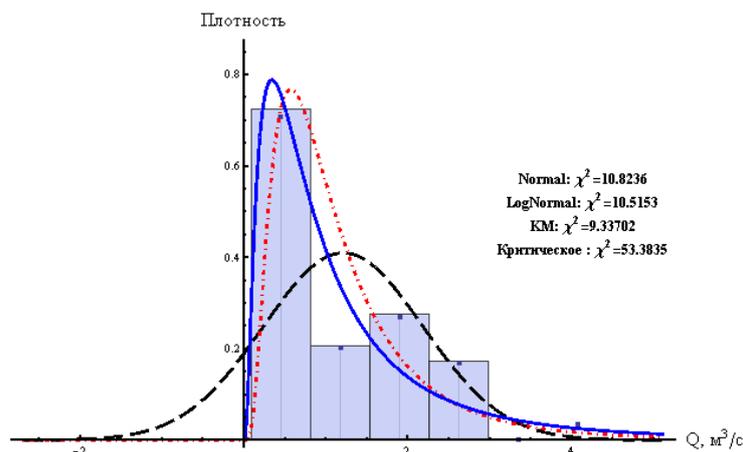


Рисунок 3. Эмпирическая и теоретические кривые плотности распределения минимальных среднемесячных расходов (сплошная линия – кривая распределения Крицкого-Менкеля; штриховая – нормальный закон распределения; штрих пунктирная линия – логнормальный закон распределения)

Для перехода от минимального среднемесячного расхода используем формулу (6) приведенную в [10].

$$Q_{p \text{ сут}} = a \cdot Q_p - \frac{b \cdot A}{1000}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты регрессии, определяемые как средние по району по связи суточных и 30-суточных минимальных расходов рек-аналогов. В случае невозможности подобрать реки-аналоги, можно для летне-осеннего периода  $a = 0,89$ ,  $b = 0,09$ , а для зимнего –  $a = 0,86$ ,  $b = 0,11$  соответственно;  $A$  – площадь бассейна до расчетного створа, км<sup>2</sup>.

Результаты расчетов представим в таблице 5.

Таблица 5 Экологический сток по методы минимальных расходов

Обеспеченность, %	Минимальные среднемесячные расходы, м <sup>3</sup> /с	Минимальные среднесуточные расходы, м <sup>3</sup> /с	Минимально-допустимые (экологические) расходы, м <sup>3</sup> /с
5	2,97	2,56	0,52
25	1,20	0,99	0,20
50	0,64	0,49	0,10
75	0,33	0,22	0,05
90	0,19	0,09	0,02
95	0,14	0,05	0,01
97	0,11	0,02	0,00

Как видно из данной таблицы, экологический сток при высоких обеспеченностях приближается к нулю, и в очень маловодные годы в соответствии с данным методом могут отсутствовать попуски в нижний бьеф водохранилища

Также по данным указанной таблицы 1 экологический сток р. Ясельда с учетом вариации среднегодового стока ( $C_v = 0,31$ ) принимается равным минимальному межённому стоку. Так как в действующем нормативном документе [10] не дается

понятия «минимальный меженный сток», можно принять его как минимальный среднесуточный расход, который уже приведен в таблице 5.

Экологический сток в соответствии с формулой (1) и таблицей 2 определится как произведение минимального среднемесячного стока на коэффициент пропорциональности  $K=0,3$ . В этом случае экологический сток несколько выше, чем по двум предыдущим методам.

В соответствии с действующими подходами в Республике Беларусь экологический сток составит  $0,11 \text{ м}^3/\text{с}$ . Причем данный показатель не зависит от расчетной обеспеченности.

На основании используемой в Швейцарии зависимости (2) экологический сток в створе водохранилища  $0,86 \text{ м}^3/\text{с}$  и в створе г. Береза  $1,13 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Рассмотренные расчетные подходы экологического стока регламентируют только минимальное значение стока реки. При этом отсутствует изменчивость стока по годам. Данный подход рекомендуется использовать в качестве контроля снижений экологического стока вычисленного с использованием иных способов.

Рассматривая более простую реализацию способа переноса обеспеченностей [15], при котором принимаются следующие переходы:  $Q_{\text{эк}}^{50} \geq Q_{\text{мес}}^{75}$ ,  $Q_{\text{эк}}^{75} \geq Q_{\text{мес}}^{95}$ ,  $Q_{\text{эк}}^{95} \geq Q_{\text{мес}}^{99}$ ; получены значения экологического стока для трех основных расчетных обеспеченностей (таблица 6). Кроме переноса значения обеспеченного расхода перенесена внутригодовая структура стока реки. Внутригодовая структура стока реки очень важна при управлении водохранилищем сезонно годичного регулирования. В качестве гипотезы для оценки внутригодового распределения использовалась следующие предположения:

- по данным различных исследователей [2] внутригодовое распределение стока рек Беларусь не имеет значительных изменений в последние десятилетия. Для рек обремененных водохранилищами наблюдается изменение стока между сезонами;
- период до введения в эксплуатацию водохранилища Селец можно рассматривать в качестве эталонного при оценке структуры внутригодового распределения.

Таблица 6 Экологический сток по методы переноса обеспеченностей,  $\text{м}^3/\text{с}$

Месяцы	Обеспеченность, %		
	50	75	95
3	8,0	6,86	5,82
4	12,3	10,53	8,94
5	3,74	3,18	2,70
6	1,24	0,575	0,488
7	0,88	0,402	0,341
8	0,481	0,195	0,166
9	0,311	0,153	0,130
10	0,744	0,338	0,287
11	1,23	0,533	0,452
12	1,82	0,98	0,84
1	1,08	0,580	0,492
2	0,650	0,321	0,272
	2,71	2,06	1,74

На основании изложенных гипотез методом компоновки сезонов определена внутригодовая структура стока для реки Ясельда по створам Хорева и Береза. Так же как и ранее выявлены незначительные отличия в структуре стока по данным постам. Это в основном связано с наличием пропусков и меньшей длины временного ряда по створу Хорева.

Как указывалось выше применение полноценного способа переноса обеспеченностей (оценка параметров функции распределения) по двум точкам приводит к значительным расхождениям в результатах. При этом сильно влияет на результат структура временного ряда. Поэтому предложено использовать три точки для оценки параметров функции распределения. Возможно два близких варианта выбора перехода обеспеченностей:

- $25\% \Rightarrow 5\%$ ,  $50\% \Rightarrow 25\%$ ,  $99\% \Rightarrow 95\%$  ;
- $25\% \Rightarrow 5\%$ ,  $75\% \Rightarrow 50\%$ ,  $99\% \Rightarrow 95\%$  .

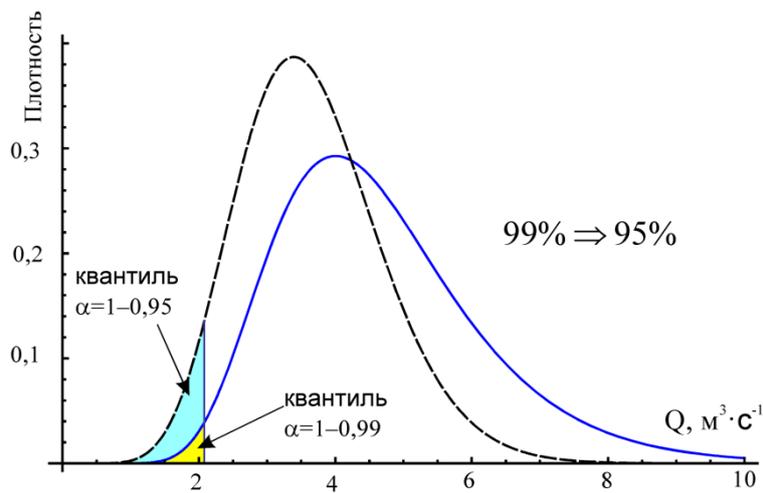
Первый вариант ближе к методу перехода предложенному в [14], только с добавлением одной точки  $25\% \Rightarrow 5\%$ . Второй вариант составлен в большей степени интуитивно, но при этом базируется на подходах описанных выше. Перенос обеспеченностей позволит получить функцию плотности распределения случайной величины экологического стока. Это дает возможность в зависимости от сути инженерной задачи получить экологический сток заданной обеспеченности. После чего можно получить внутригодовую структуру экологического стока, которая учитывает важные с биологической точки зрения периоды водности реки. Перенос обеспеченностей применим не только к функции распределения Крицкого–Менкеля, а возможно без ограничений его применение и для других законов распределения. В этом случае составляется уравнение подобное (7) для выбранного закона распределения. Это подтверждает универсальность метода, а также отсутствие возможности манипуляции результатом в угоду интересам отдельных водопользователей. Особое внимание следует уделить выбору параметров переноса обеспеченностей. Как указывалось выше, применяемые в данной статье параметры переноса обеспеченностей носят экспертный характер (определены на основе экспертных оценок). Для учета биологических, гидробиологических, социальных и экономических функций водотока (реки) при определении параметров переноса обеспеченностей возможно применение алгоритма группировки водотоков изложенного в [17]. В этом случае на основе группировки различных водотоков по их природным особенностям можно применять одни параметры переноса обеспеченностей в рамках одного класса. При этом, в каждом классе необходимо присутствие хотя бы одного объекта с репрезентативными данными мониторинга о связи водности реки (в том числе в пределах календарного года) с качеством реализации ею средообразующей и средовоспроизводящей функции. Как итог применения алгоритма [17] могут быть составленные карты (схемы) зонирования параметров переноса обеспеченностей для определения характеристик функции распределения экологического стока.

Годовой сток рассматриваем за период 1945–2013 гг. по створу г. Береза. Как и в случае с минимальным месячным стоком, наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого–Менкеля. Для оценки параметров данной функции решается система дифференциальных уравнений:

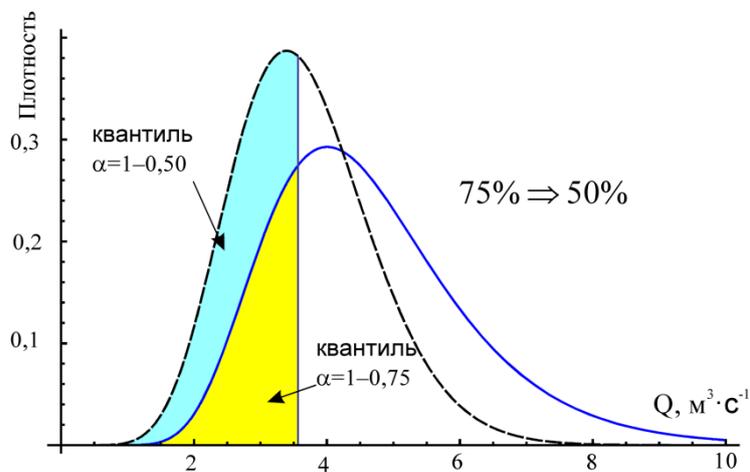
$$\left\{ \begin{aligned} 1-0,95 &= \int_0^{Q_{99\%}} \left( \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left( \frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left( \frac{\Gamma(\gamma+b)q}{\Gamma(\gamma)\bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \\ 1-0,25 &= \int_0^{Q_{50\%}} \left( \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left( \frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left( \frac{\Gamma(\gamma+b)q}{\Gamma(\gamma)\bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \\ 1-0,05 &= \int_0^{Q_{25\%}} \left( \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{Q} \cdot b \cdot \Gamma(\gamma)} \left( \frac{q}{\bar{Q}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} e^{-\left( \frac{\Gamma(\gamma+b)q}{\Gamma(\gamma)\bar{Q}} \right)^{\frac{1}{b}}} dq \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где  $b, \gamma, \bar{Q}$  – искомые параметры распределения случайной величины расхода воды;  $\Gamma(\gamma)$  – гамма-функция;  $Q_{P\%}$  – расход воды в водотоке  $P\%$ -ой обеспеченности,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

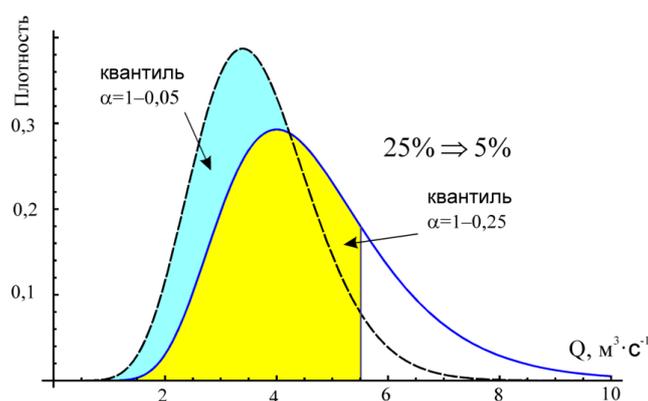
Аналогичное уравнение составляется и для второго варианта переноса обеспеченностей. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока. На рисунке 4(а-в) приведена вторая схема переноса обеспеченностей. Кривая экологического стока несколько сместилась влево и приобрела вид близкий к нормальному закону распределения.



а



б



В

Рисунок 4. Кривые плотности распределения среднегодового стока (сплошная линия) и экологического стока (штриховая линия)

а – переход 99% ⇒ 95% ; б – переход 75% ⇒ 50% ; в – переход 25% ⇒ 5%

Представим полученные результаты оценки экологического стока в обобщенной таблице 7. Для этого рассмотрим обеспеченность стока 75 %, как наиболее часто используемую при проектировании водохозяйственных объектов.

Таблица 7 Сводная таблице оценки экологического стока р. Ясельда различными методами, м<sup>3</sup>/с

Месяцы	Естественный сток	Перенос обеспеченностей (упрощенный метод)	Перенос обеспеченностей	Метод, применяемый в Швейцарии	Метод, применяемый в Беларуси	Метод, применяемый в Украине	Минимальных расходов (коэффициент вариации)	Минимальных расходов (20 % мин. сут. расхода)
3	9,02	6,86	7,59	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
4	13,85	10,53	11,65	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
5	4,18	3,18	3,52	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
6	0,76	0,58	0,64	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
7	0,53	0,40	0,44	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
8	0,26	0,20	0,22	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
9	0,20	0,15	0,17	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
10	0,44	0,34	0,37	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
11	0,70	0,53	0,59	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
12	1,29	0,98	1,08	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
1	0,76	0,58	0,64	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
2	0,42	0,32	0,36	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05
Год	2,71	2,06	2,28	0,86	0,13	0,132	0,22	0,05

### Заключение

Рассмотрев различные методы оценки экологического стока, проанализировав основные требования, предъявляемые к его величине и вычислив на их основе минимальный экологически обоснованный сток р. Ясельда выявлено значительное расхождение в результатах. Различия в результатах, в первую очередь, связаны с

различиями в предпосылках каждого метода, а также в экономических и социальных условиях, при которых они формировались.

Методики оценки, используемые в Беларуси и Украине, дали практически одинаковые результаты, что свидетельствует о формировании их в близких экономических условиях и научных кругах. Методы минимальных расходов дали значительно отличающиеся результаты, хотя и исходят из одних принципов (вариации стока, класс реки). Так метод минимальных расходов (ряд 7) определил экологический сток в сентябре даже выше чем естественный сток р. Ясельда в данном месяце. Подход, применяемый в Швейцарии, определил объем экологического стока в размере около 32 % от естественного стока реки. То есть примерно треть всего объема стока должна поступать в нижний бьеф водохранилища.

Наиболее перспективными видится методика переноса обеспеченностей, так как обладает возможностью внутригодовой изменчивости экологического стока. В данном случае полученные результаты этим методом могут быть рекомендованы к использованию при составлении (уточнении) водохозяйственного баланса в бассейне р. Ясельда. Однако применяемы переходы носят субъективный характер и требуют эколого-экономического обоснования для различных естественных условий. При этом может быть частичное зонирование параметров переноса обеспеченностей в зависимости от естественных условий реки, уровня развития промышленности, уровня трансформации ландшафтов, исторической или социальной значимости района.

Также следует отметить, что в дальнейшем необходимо учитывать повторяемости наводнений и засух при оценке экологического стока. Такой подход требует ежегодной корректировки величины экологического стока с учетом водности прошедших лет. Так, например, при продолжительном отсутствии затопления поймы реки (период больше средней периодичности затопления в данных гидрологических условиях) руководящие органы должны скорректировать экологический сток на следующий год для обеспечения обводнения пойменной части реки.

### Литература

1. Владимиров А.М., Имамов Ф.А. Принцип оценки экологического стока рек. Вопросы экологии и гидрологические расчеты. Санкт-П. 1994.
2. Внутригодовое распределение стока рек Беларуси и его статистическое моделирование / А.А. Волчек, О.Н. Натарова // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. № 2(62): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 46 - 55.
3. Волчек, А.А. Учет разовых гидрометрических измерений при определении основных гидрологических характеристик и параметров русла / А.А. Волчек, Н.Н. Шешко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2011. – № 2(68): Водохозяйственное строительство и теплотехника. – С. 7–13.
4. Коваленко Э.П. Фащевский Б.В. Вода, природа, человек. Минск: Ураджай, 1986.
5. Ладынина Н.В. Определение резервируемого стока малых рек Молдавии. //В кн. Рациональное использование поверхностных и подземных вод. М., 1986.
6. Ланцова И.В., Тулякова Г.В. Малые реки. Тольятти: ИЭВБ, 2001.
7. Маркин В.Н. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек. «Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России» (сборник научных трудов). – Москва: МГУП, 2005.

8. Маркин, В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки // В.Н. Маркин // Оценка экологически допустимого воздействия на малые реки [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Дата доступа: 04.05.2005.
9. Павлович, Н. Питиевые подземные воды: вчера, сегодня, завтра // Н. Павлович / Строительство и недвижимость [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2004/22/sn42212.html> – Дата доступа: 24.04.2015.
10. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250)// Минск:РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
11. Реймерс Н.Ф. Природопользование. М.: Мысль, 1990.
12. Рэкі і каналы // Беларуская Савецкая Энцыклапедыя: у 12 т. / гал. рэд. П. У. Броўка. — Т. 12: БССР. — Мн.: Беларуская Савецкая Энцыклапедыя, 1975. — С. 30-32.
13. Ткачев Б.П. Буланов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. Новосибирск, 2002.
14. Фащевский Б.В. Проблемы экологического нормирования водного режима рек. //Мелиорация и водное хозяйство, 1993. № 5.
15. Фащевский Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока. Минск, 1989.
16. Чалов Р.С. (1997) Общее и географическое русловедение. М.: МГУ. 1997. 112 с.
17. Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*, 16(4), 1311-1318.
18. Dyson, M., G. Berkamp, , and J. Scanlon, Editors. 2003. *Flow: the essentials of environmental flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
19. European Commission (2015) *Guidance Document n°31. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive*.
20. Smakhtin, V., C. Revenga, and P. Döll. 2004. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International* 29:307–317.
21. Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19:397–442.

## УДК 551.31- 629

*Гавардашвили Г. В., д-р техн. наук, профессор, директор института водного хозяйства им. Ц. Мицхулава Грузинского технического университета, г. Тбилиси, Грузия, e-mail: givi\_gagva@yahoo.com*

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРИДОРЕ НЕФТЕГАЗОТРУБОПРОВОДА БАКУ-ТБИЛИСИ-ДЖЕЙХАН И БАКУ-ТБИЛИСИ ЭЗРУМ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВЫХ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

*Аннотация.* На основании натурных исследований проведенных в 2014 - 2016 гг на трассе нефтегазотрубопровода Баку-Тбилиси-Джейхан и Баку-Тбилиси-Эзрум были изучены эрозионные процессы горных склонов. На основе вышеизложенного предложены новые противоэрозионные сооружения, которые дадут возможность довести до минимума экологические нарушения горных ландшафтов.

*Ключевые слова:* нефтегазотрубопровод, эрозия, противоэрозионные сооружения.