

М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев

ОЦЕНКА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО ДАННЫМ О ГОДОВОМ ТВЕРДОМ СТОКЕ ПРИТОКОВ (НА ПРИМЕРЕ СЕСТРОРЕЦКОГО РАЗЛИВА)

M.V. Shmakova, S.A. Kondratyev

ASSESSMENT OF RESERVOIR SEDIMENTATION BASED ON DATA OF ANNUAL SEDIMENT DISCHARGE IN TRIBUTARIES (SESTRORETSKIY RASLIV AS A CASE STUDY)

Одним из определяющих факторов скорости заиления водохранилищ является твердый сток его притоков. Предложен метод расчета расхода наносов в основных притоках. На основе метода с хорошей точностью оценено поступление наносов в водохранилище Сестрорецкий Разлив.

Ключевые слова: водохранилище, заиление, притоки, расход наносов.

One of the main factors of the sedimentation rate in reservoir is the sediment inflow with its tributaries. The method for calculating the sediment discharge in tributaries was developed. Based on this method the sediment inflow in the reservoir Sestroretsky Razliv was estimated precisely.

Key words: reservoir, sedimentation, tributary, sediment discharge.

Общие положения

При решении ряда водохозяйственных задач, связанных с заилением водохранилищ, возникает необходимость оценки годового твердого стока основных притоков. Рекомендации по расчету твердого стока [4] основаны на использовании данных о мутности расчетной реки или реки-аналога. Однако при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе приведенные методики оценки нормы твердого стока не подходят. Как правило, недостаточность и некорректность данных наблюдений за расходом наносов в реках не дают возможность получить достоверную информацию о параметрах его распределения.

Целью настоящего исследования является разработка и апробация метода оценки годового твердого стока рек как одного из основных факторов заиления водохранилищ речными наносами

Для оценки параметров распределения расходов наносов использован композиционный метод, который позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Для применения указанного метода необходимо располагать формулой, адекватно описывающей взаимосвязь расхода наносов и гидравлических характеристик потока. Причем, гидравлические характеристики потока должны относиться к стандартной гидрометрической информации,

характер распределения которой хорошо изучен. Для этих целей может использоваться аналитическая формула расхода наносов [6, 7].

Формула для расчета расхода наносов

Основное уравнение математической модели движения воды и твердого вещества в речном потоке имеет вид [6]:

$$(1 - f) \left(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] - m \frac{dv}{dt} \right) - N_{act} m_{\text{ч}} \frac{dv_{\text{ч}}}{dt} + N_{act} m_{\text{ч}} g - cS = 0, \quad (1)$$

где m — масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; I — уклон дна; H — глубина потока, м; L — расстояние, м; v — скорость потока, м/с; t — время, с; $m_{\text{ч}}$ — масса частицы, кг; $v_{\text{ч}}$ — скорость движения частицы, м/с; f — коэффициент внутреннего трения, б/р; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); S — площадь приложения силы, м²; N_{act} — количество перемещаемых частиц в потоке.

Уравнение движения воды и твердого вещества замыкается уравнениями неразрывности потока, равнодействующей скорости движения частиц и баланса кинетической энергии потока воды и твердого вещества. Для условий равномерного установившегося движения после некоторых преобразований этого уравнения получено, что расход наносов G , то есть масса твердого вещества, проходящая через поперечное сечение потока за единицу времени (кг/с), равен [6, 7]:

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{Hg} - (1 - f) \rho_{\text{воды}} I \right], \quad (2)$$

где $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$ — плотности воды и грунта, кг/м³; Q — расход воды, м³/с.

Следует заметить, что расход наносов G включает и взвешенные и влекомые наносы. Параметры сопротивления f и c для речных потоков определяются в соответствии с категорией крупности донных отложений по табл. 1 [7]. В настоящее время значения параметров, приведенных в табл. 1, уточняются.

В зависимости от водности потока меняется и характер сопротивления потоку дна и берегов. Изменяется значение смоченного периметра в расчетном створе, так как имеет место зарастание русла в период межени, выход воды на пойму в половодье, и т.д. Таким образом, параметры f и c в формуле расхода наносов должны назначаться с учетом водности потока. Для этого можно выделить три основные фазы водности — половодье, межень и период средней водности, для которых и определяются параметры формулы.

Значения параметров f и c в зависимости от категории крупности донных отложений для периода средней водности

Вид донных отложений	Категория крупности донных отложений	Коэффициент внутреннего трения f , б/р	Сцепление частиц грунта при сдвиге c , кг/(м·с ²)
Суглинки	2	0,94	2,01
Песок	3	0,943	3,93
Песчано-галечные	4	0,95	5,23
Гравий	5	0,96	5,5
Галечно-гравелистые	6	0,98	5,5

Расчет среднемноголетнего расхода наносов

Как уже было отмечено выше, композиционный метод позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Аргументами являются расход воды и средняя глубина потока, функцией — расход наносов. Кривые распределения суточных расходов воды обеспечены, как правило, достаточно продолжительными и надежными по качеству рядами наблюдений. Средняя глубина потока может быть получена по кривой $Q = f(H)$.

Для приведения суточных расходов воды к нормальному закону распределения удобно использовать одно из следующих выражений для нормализации суточных значений расходов воды:

$$\varphi_i = (Q_i + 1)^n \ln(Q_i + 1), \quad \varphi_i = e^{nQ_i} \ln(Q_i + 1), \quad \varphi_i = (Q_i + 1)^n, \quad (3)$$

где n — параметр нормализации.

Структура моделирования расхода наносов представлена на рис. 1. Исходными данными для расчета являются:

- Параметры распределения нормализованных значений суточных расходов воды (среднее, среднее квадратичное значения).
- Вид и параметры функции $Q = f(H)$.
- Величина среднего уклона русла.
- Крупность донных отложений.
- Параметры формулы расхода наносов для разных фаз водности — половодье, межень и период средней водности.

Основными этапами моделирования являются:

- Генерирование ряда нормально распределенных случайных чисел.
- Преобразование полученного ряда в ряд суточных расходов воды операциями, обратными нормированию и нормализации.
- Расчет значений средних глубин потока по соответствующим расходам воды $Q = f(H)$.

- Вычисление расходов наносов по расходам воды и средней глубины потока. В зависимости от расхода воды, при вычислении по формуле принимаются соответствующие значения параметров формулы расхода наносов.
- Построение кривой распределения расходов наносов и оценивание ее параметров.

Для оценки расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными величинами годового твердого стока наблюдаемое значение годового стока взвешенных наносов следует привести к общему стоку наносов посредством известных соотношений между годовыми значениями взвешенных и влекомых наносов [2, 5].



Рис. 1. Структура моделирования расхода наносов (где $\bar{\varphi}$ и \bar{G} — среднегодовые значения нормализованных расходов воды, м³/с и наносов, кг/с; G_{φ} — среднее квадратичное отклонение нормализованных суточных расходов воды; N — длина генерируемого ряда; i — индекс)

Расчет среднегодового расхода наносов

В качестве объекта применения предложенной методики выбрано водохранилище Сестрорецкий Разлив, основными притоками являются реки Сестра и Черная с

общей площадью водосбора 566 км². По данным наблюдений за расходами наносов твердый сток рек Черная и Сестра составил около 3,5 тыс. т/год. Причем, на р. Сестра приходится около 2,4 тыс. т/год, на р. Черная — 1,1 тыс. т/год. Это составляет около 85 % от общей массы поступивших в водохранилище веществ, при этом свыше 60 % наносов остается в водоеме в виде донных отложений, остальное выносится. По некоторым данным, средняя скорость осадконакопления сейчас составляет около 3 см/год [3]. При крайне небольших глубинах основной части Сестрорецкого Разлива (1–2 м) такая интенсивность осадконакопления приводит к быстрому сокращению объема и площади водоема [3].

На рис. 2 и 3 приведены зависимости $Q = f(H)$ для р. Сестра — ст. Белоостров и р. Черная — п. Дибуны и функции, их аппроксимирующие.

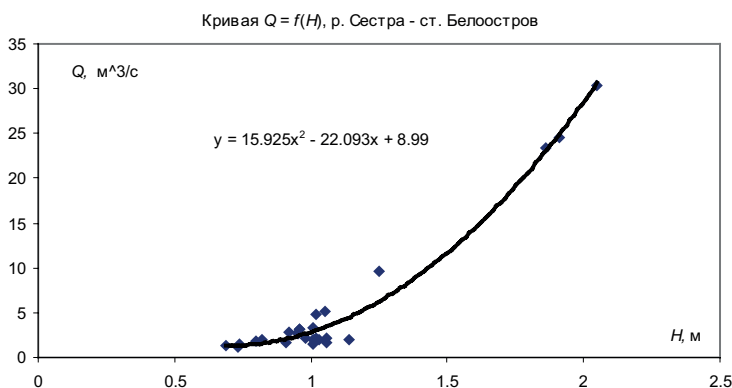


Рис. 2. Кривая $Q = f(H)$ для р. Сестра — ст. Белоостров

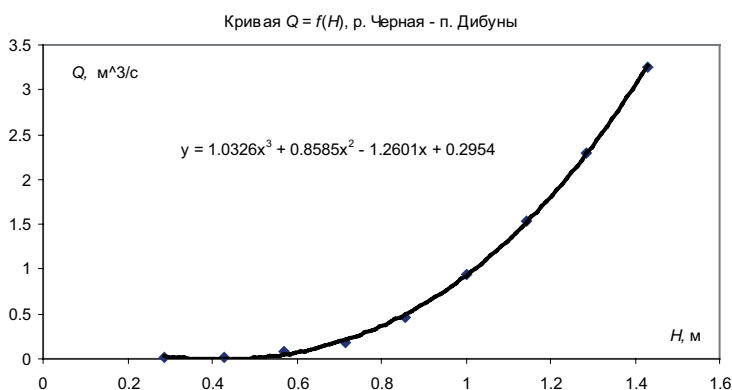


Рис. 3. Кривая $Q = f(H)$ для р. Черная — п. Дибуны

Для рек Сестра и Черная сгенерированы ряды суточных расходов воды длиной 36500 значений (100 лет) и для каждого расхода воды рассчитаны средняя глубина потока и расход наносов. Среднее относительное отклонение между среднесуточными рассчитанными и измеренными значениями расходов наносов составило 6 % для р. Сестра и 16 % для р. Черная. Данные для расчета и результаты моделирования приведены в табл. 2. Основными возможными причинами отклонения являются погрешность аппроксимации эмпирических точек $Q = f(H)$, и ошибки измерения расхода наносов, с которым сравнивается рассчитанный расход наносов.

Таблица 2

Данные для расчетов и результаты моделирования годового твердого стока рек Сестра и Черная

	р. Сестра — ст. Белоостров	р. Черная — пос. Дибунь
F , км ²	390	88
I , б/р	0,00214	0,00248
$c_{\text{ср.вод.}}$, кг/(м·с ²)	1,4	1,6
$f_{\text{ср.вод.}}$, б/р	0,943	0,943
$c_{\text{меж.}}$, кг/(м·с ²)	1,5	1,5
$f_{\text{меж.}}$, б/р	0,95	0,95
$c_{\text{пол.}}$, кг/(м·с ²)	1,5	1,5
$f_{\text{пол.}}$, б/р	0,95	0,95
Q	4,28	0,916
σ_Q	6,5	1,39
$G_{\text{ср.рас.}}$, т/год	2254	926
$G_{\text{ср.набл.}}$, т/год	2400	1100
$\frac{ G_{\text{ср.рас.}} - G_{\text{ср.набл.}} }{G_{\text{ср.набл.}}} \cdot 100\%$	6	16

Расчет периода заиления водохранилища речными наносами

Основными характеристиками заиления являются интенсивность и срок заиления. Суммарная приближенная оценка продолжительности заполнения водохранилища наносами может быть вычислена по формуле [1]:

$$T = \frac{W_B}{W_H(1-\delta)}, \tag{4}$$

где T — средняя продолжительность периода заиления водохранилища в годах; W_B — мертвый объем водохранилища, м³; W_H — средний годовой объем наносов, м³; δ — транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов, для равнинных водотоков в среднем $\delta = 0,3 - 0,4$.

Средний годовой объем наносов W_n , может быть определен по формуле:

$$W_n = \frac{31500G_{\text{ср.}}}{\beta}, \quad (5)$$

где $G_{\text{ср.}}$ — средний годовой расход наносов, кг/сек; β — объемный вес наносов, т/м³, равный от 0,5...0,7 для илистых наносов в первые годы отложений до 1,0...1,5 для песчаных или илистых уплотненных наносов.

В табл. 3 приведены данные для расчета и результаты вычислений периодов заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива (T_n и T_p соответственно) для наблюдаемых $G_{\text{ср.набл}}$ и рассчитанных $G_{\text{ср.рас}}$ расходов наносов. Периоды заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, полученные по наблюдаемым и рассчитанным данным за расходами наносов, отличаются не более чем на 10 %. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что речные наносы не являются основной причиной заиления Сестрорецкого Разлива. Одной из главных экологической проблемой Разлива является высокая скорость органического осадконакопления [3]. Причинами этого являются, прежде всего, сброс неочищенных сточных вод, наличие на водосборе сельскохозяйственных угодий, различных производственных комплексов, населенных пунктов, садоводческих участков, часть из которых расположена непосредственно в водоохранной зоне притоков. Замедленный водообмен Сестрорецкого Разлива, его мелководность и наличие застойных зон приводят к накоплению загрязняющих веществ в акватории водохранилища помимо поступления взвешенных частиц со стоком притоков.

Таблица 3

Данные для расчета и результаты вычисления скорости заиления речными наносами для Сестрорецкого Разлива

W_n , м ³	W_n , кг/год (для $G_{\text{ср.набл}}$)	$G_{\text{ср.набл}}$, кг/с	$G_{\text{ср.рас}}$, кг/с	$G_{\text{ср.прогноз}}$, кг/с	T_n , год	T_p , год
6 106	3,5 106	0,11	0,1	0,19	2664	2930

Выводы

Предложен метод оценки годового твердого стока рек как одного из основных факторов заиления водохранилищ речными наносами. Расчет параметров функции распределения расхода наносов в речном потоке основан на использовании композиционного метода теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов, предложенной ранее в [6]. Метод позволил с хорошей точностью оценить поступление наносов в водохранилище Сестрорецкий Разлив со стоком основных притоков — рек Сестра и Черная. Показано, что речные наносы не являются основным фактором заиления Сестрорецкого Разлива. По-видимому, в изучаемом водохранилище доминирует органическое осадконакопление.

Литература

1. *Догановский А.М., Орлов В.Г.* Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). — СПб.: РГГМУ, 2011. — 315 с.
2. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. — М.: Географгиз, 1952. — 368 с.
3. *Природа Сестрорецкой низины.* — СПб.: СПбГУ, 2011. — 263 с.
4. *Указания по расчету стока наносов.* ВСН 01-73. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 30 с.
5. *Чалов Р.С., Алексеевский Н.И., Лю Шугуан.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. — М., 2000. — 216 с.
6. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб: Издательство Лема, 2013. — 142 с.
7. *Шмакова М.В.* Расчет заносимости русловых карьеров. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 46–57.