



УДК 556.5

DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-1-94-107

Критерии подбора рек-аналогов в расчетах расхода наносов

Шмакова М.В.

Институт озероведения Российской академии наук,
обособленное структурное подразделение «Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
Россия, 196105, СПб, ул. Севастьянова, 9
E-mail: m-shmakova@yandex.ru

Аннотация: Выбор реки-аналога для назначения параметра трения в формулах расхода наносов представляется затрудненным ввиду известной ограниченности наблюдений за твердым стоком и отсутствием публикаций в последних изданиях гидрологических ежегодников измеренных значений гидравлических переменных состояния потока – средней скорости течения, средней глубины потока. В связи с этим для назначения параметра трения в формулах расхода наносов приходится определяться с выбором реки-аналога умозрительно, отдавая предпочтение количественному соответствию одних аргументов и пренебрегая другими. В данной работе рассмотрены три группы водотоков в выделенных гидравлических диапазонах (водности, глубины потока и уклона) и проведено масштабирование по основным аргументам параметра трения – скорости потока, глубины, уклона и средней крупности донных отложений. Выявлено, что для больших равнинных рек значимо соответствие всех аргументов, тогда как для горных рек важно соответствие только кинематических аргументов формул. При этом для малых и средних рек равнинного типа значимость аргументов определяется типом расчетной формулы. Полученные результаты могут быть полезны при выборе реки-аналога при отсутствии данных наблюдений в соответствии с весом рассматриваемых аргументов в некоторых формулах общего расхода наносов.

Ключевые слова: формула расхода наносов, наносы, речная гидравлика, река-аналог, критерий соответствия, параметр трения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме №0154-2019-0003.

Для цитирования: Шмакова М.В. 2022. Критерии подбора рек-аналогов в расчетах расхода наносов. Региональные геосистемы, 46(1): 94–107. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-94-107

Criteria for Selecting Analogous Rivers in Sediment Flow Calculations

Marina V. Shmakova

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanova St, Saint-Petersburg 196105, Russia
E-mail: m-shmakova@yandex.ru

Abstract. The choice of an analog river for assigning the friction parameter in sediment flow formulas seems difficult due to the known limitations of observations of solid runoff and the lack of publications in the latest editions of Hydrological yearbooks of measured values of hydraulic variables of the flow state – the average flow velocity, the average flow depth. In this regard, to assign the friction parameter in the sediment flow formulas, it is necessary to determine the choice of an analog river speculatively, giving preference to the correspondence of one argument and neglecting the other. In this paper, three groups of watercourses in the selected hydraulic ranges are considered and scaling is carried out according to the main arguments of the friction parameter – flow velocity, depth, slope and average size of bottom



sediments. It is revealed that for large flat rivers, the correspondence of all arguments is significant, whereas for mountain rivers, the correspondence of only the kinematic arguments of formulas is important. For small and medium-sized rivers of the lowland type, however, the significance of the arguments is determined by the type of calculation formula. The results obtained can be useful when choosing an analog river in accordance with the weight of the arguments under consideration in some formulas for the total sediment flow.

Keywords: sediment transport formula, sediments, river hydraulics, rivers-analogues, compliance criterion, friction parameter

Acknowledgements: The research was funded by the study № 0154-2019-0003 of the State research plan for the IL RAS.

For citation: Shmakova M.V. 2022. Criteria for Selecting Analogous Rivers in Sediment Flow Calculations. *Regional Geosystems*, 46(1): 94–107 (in Russian) DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-94-107

Введение

В гидрологической практике для неосвещенных наблюдениями водотоков за основу оценки основных гидрологических величин принимаются результаты расчетов этих показателей или аргументы для их расчетов по так называемым рекам-аналогам и их водосборным бассейнам [СП 33-101-2003; Методические рекомендации ..., 2009; СП 58.13330.2012]. При этом можно выделить следующие типы гидрологических величин:

1. Удельные гидрологические величины. Эти величины, полученные в результате пространственно-временных обобщений, по сути, являются региональными и показывают общие закономерности формирования твердого и водного стока на водосборе и представлены как интегральные функции климатических и пространственных факторов (модуль и слой стока, модуль твердого стока, среднегодовая мутность воды и так далее).

2. Параметры распределения гидрологических величин (коэффициенты вариации и асимметрии, квантили разной обеспеченности и так далее).

3. Динамические характеристики системы (гидрографы стока воды весеннего половодья и дождевых паводков, внутригодовое распределение стока).

4. Статические характеристики, которые принимаются постоянными для текущего состояния системы (коэффициент стока, редукции, параметр шероховатости и так далее).

В современной отечественной и зарубежной научной литературе достаточно публикаций, посвященных вопросам расчета гидрологических величин при недостаточности или отсутствии данных наблюдений [Любанов, Никитин, 2006; Гагарина, 2011; Космаков и др., 2013; Cai et al., 2017; Dahe, Deshmukh, 2018]. Однако методические аспекты подбора рек-аналогов, выходящие за рамки рекомендуемых в известных нормативах, в этих работах почти не рассматриваются. При этом определенную сложность вызывает оценка не самих гидрологических величин, а параметров динамической системы для последующих более детальных расчетов. В масштабах речной гидравлической системы к таким параметрам относится показатель трения. Некоторые аргументы, определяющие этот показатель, отличаются достаточно большой изменчивостью даже в пределах одного водотока.

Как показала практика расчетов, оценка параметра трения в формулах расхода воды и расхода наносов по обобщенной информации о крупности донных отложений в большинстве случаев не дает приемлемого результата. Вне всякого сомнения, приведенные зависимости служат хорошими количественными ориентирами для первичных оценок искомых гидравлических переменных состояния речного потока. Но для более точных детальных расчетов требуется уточнение значений этой величины. И, если позволяют данные наблюдений за гидравлическими переменными состояния речного потока, проводится дополнительная калибровка этого параметра.



Ввиду многообразия водотоков по водности, гидравлическим характеристикам, форме русла и донным отложениям достаточно сложно унифицировать зависимости параметра трения от отмеченных аргументов. И в ряде случаев эпизодических данных наблюдений недостаточно для полноценной калибровки этого параметра. Одним из возможных путей решения проблемы назначения параметра трения для гидравлических расчетов при отсутствии данных наблюдений за расходом наносов может служить выбор реки-аналога со сходными гидравлическими характеристиками.

Целью настоящей работы является анализ ключевых гидравлических факторов, определяющих вклад в значение параметра трения в формулах расхода наносов, а также определение критериев соответствия реки-аналога для оценки параметра трения в этих формулах.

Объекты и методы исследования

Параметр трения в формулах речной гидравлики. В разное время было проведено много исследований, направленных на количественную оценку параметра шероховатости. Значения этой величины соотносились с качественными характеристиками донных отложений, слагающих русло, и бурностью речного потока [Срибный, 1932]. Данные этих исследований представлены в соответствующих таблицах, например, в трудах И.Ф. Карасева [1975], рекомендациях СНИП [2.05.03-84], таблицах Чоу [Chow, 1959], результатах различных исследований [Barnes, 1967; Arcement, Schneider, 1989; Heritage et al., 2004; Melis et al., 2019; Косиченко, 2020; Ахмедова, Наумов, 2021].

При этом в настоящее время нередко оценка параметра трения в различных формулах речной гидравлики и при математическом моделировании речного потока осуществляется обратным путем, минимизацией отклонений между наблюдаемыми и рассчитанными гидравлическими переменными состояния потока. И несмотря на то что коэффициент Шези поставлен в зависимость от средней глубины потока, расчеты для разных периодов водности требуют дополнительных уточнений в значении параметра шероховатости. В свою очередь, это обусловлено тем, что сила трения определена целым комплексом факторов, и крупность донных отложений – лишь один из этих факторов. В.М. Лохтин [1895] отмечает три ключевых аргумента, которые обуславливают гидравлическое своеобразие водотока: водность, уклон и размываемость ложа реки. Остальные характеристики водотока и его русла являются результатом взаимодействия указанных аргументов [Лохтин, 1895]. Приведенные аргументы представлены во многих физически обоснованных формулах расхода наносов. Последнее хорошо проиллюстрировано в работе [Лепихин, Возняк, 2020], где в результате аналитических построений получена функция удельного расхода наносов в общем виде. Сочетание этих аргументов определяет также и значение основного параметра таких формул – показателя трения (см. рисунок).



Факторы, определяющие значение параметра трения в формулах речной гидравлики
Factors determining the value of the friction parameter in river hydraulics formulas



Сопротивление русла водотока также определяется и геометрическим масштабом такового и формой его поперечного сечения. Так, значения смоченного периметра русла при разном соотношении ширины русла и высоты берегов при одинаковой водности будут различаться. В свою очередь, это обусловит разницу в значениях площади приложения силы, и, как следствие, в значениях сопротивления на твердой границе потока.

Таким образом, подбор реки-аналога должен быть обусловлен соответствием водности, уклона русла, формы поперечного сечения и крупности донных отложений для исследуемого водотока. Однако в связи с известной ограниченностью наблюдений за твердым стоком найти реку-аналог той же физико-географической принадлежности с точным соответствием этих показателей нередко бывает невозможно. При этом встает вопрос обоснования критерия соответствия исследуемого водотока при выборе реки-аналога – приоритет этих характеристик (вес того или иного аргумента) и какие характеристики должны определять это соответствие?

Формулы сопротивления трения в речной гидравлике. Сопротивление трения представляет проекцию результирующей всех касательных сил, действующих вдоль твердой границы по направлению движения. В речной гидравлике в качестве сопротивления трения используют такие величины, как коэффициент Шези C (коэффициент сопротивления трения по длине), параметр шероховатости n , гидравлическое трение λ , а также сцепление частиц грунта при сдвиге c и коэффициент внутреннего трения f . При этом значения параметров трения при прочих равных гидравлико-морфологических условиях определяются водностью потока. Водность потока, с одной стороны, обуславливает площадь взаимодействия речного потока и русла, а с другой стороны, определяет значение гидродинамического давления на твердую границу потока. Например, сила трения $F_{\text{сопр}}$ может быть представлена по аналогии с известной в грунтоведении зависимостью сопротивления грунта сдвигу давлению со стороны потока [Бабков и др., 1950]:

$$F_{\text{сопр}} = Pf + cS,$$

где давление со стороны потока P представляет собой комплекс сил ($F_{\text{потока}}$), действующих в потоке на движущиеся и неподвижные частицы грунта; c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м×с²); f – коэффициент внутреннего трения, б/р; S – площадь приложения силы, м². То есть, с увеличением массы движущегося потока возрастает и касательное напряжение на его твердой границе.

Наиболее используемая в расчетах речной гидравлики формула коэффициента Шези (формула Н.Н. Павловского) C , м^{0.5}/с имеет вид [Карасев, 1975]:

$$C = \frac{R^y}{n},$$

где R – гидравлический радиус, м; y – показатель степени, зависящий от значений коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса.

Гидравлическое трение λ в формуле Дарси-Вейсбаха связано с коэффициентом сопротивления C следующей зависимостью [Карасев, 1975]:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Касательное напряжение на твердой границе потока τ , кг/(м×с²), представляющее собой результирующую всех сил сопротивления, отнесенную к единице площади поверхности, прямо пропорционально гидравлическому трению:



$$\tau = -\lambda|v|v.$$

где v – скорость потока, м/с.

Таким образом, изменение касательного напряжения на твердой границе потока в зависимости от водности потока должно отразиться на параметре, характеризующем трение в соответствующих гидравлических формулах и моделях. При этом также многие исследователи ставят значение гидравлического сопротивления в зависимость от режима движения потока – установившееся и неустановившееся движение [Карасев, 1975]. «... гидравлические сопротивления зависят не только от наполнения русла и шероховатости, но и от предыстории движения» [Карасев, Коваленко, 1994].

Анализ расчетных формул. Рассмотрим несколько формул общего расхода наносов и проанализируем связь параметра сопротивления трения с основными гидравлическими показателями – крупностью донных отложений, водностью речного потока и уклоном. Для анализа были выбраны четыре формулы общего расхода наносов – формулы Карима-Кеннеди, Энгелунда-Хансена, Бэгнольда, а также аналитическая формула расхода наносов [Шмакова, 2018]. Эти формулы показали наиболее хороший результат в расчетах при проведении сравнительного анализа расчетных формул данного типа на независимом материале [Шмакова, 2018].

Аналитическая формула расхода наносов имеет вид [Шмакова, 2018]:

$$G = \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[\frac{c}{hg} - \rho_{\text{в}}(1-f)I \right], \quad (1)$$

где G – общий расход наносов, кг/с; Q – расход воды, м³/с; $\rho_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотность грунта и воды соответственно, кг/м³; I – уклон дна, б/р; h – глубина потока, м; f – коэффициент внутреннего трения, б/р (допускается значение $f > 1$); c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м×с²); g – ускорение свободного падения, м/с².

Параметры f и c формулы (1) зависят от фазы водности водотока и крупности донных отложений. Для определения значений параметра f могут быть использованы зависимости для разных периодов водности, приведенные в работе [Шмакова, 2020]. Аппроксимируя эти зависимости линейными функциями для разных периодов водности (достоверность аппроксимаций составила 0,92, 0,99 и 0,83 для каждого периода водности соответственно), получим:

$$\begin{aligned} f_1 &= -0.1293D + 1.7143, \\ f_2 &= -0.0477D + 1.2937, \\ f_3 &= -0.0114D + 1.0556, \end{aligned}$$

или в общем виде:

$$f_i = a_i D + b_i,$$

где i – индекс водности (1 – максимальная (обеспеченностью $P \leq 33,3\%$)), 2 – средняя ($33,3 < P < 66,7\%$), 3 – минимальная водность ($P \geq 66,7\%$)); D – качественный признак крупности донных отложений: 1 – суглинки; 2 – песок; 3 – песчано-галечные; 4 – гравий; 5 – галька.

Значения параметра c для связанного грунта (суглинки) в среднем по результатам оптимизации для исследуемых рек равны 0,385, 0,505 и 1,55 кг/(м×с²) для периодов малой, средней и большой водности соответственно. Для несвязанного грунта для большинства расчетных рек в периоды средней и большой водности значения параметра c в результате оптимизации получались равными нулю. Для периода малой водности значения этого параметра при оптимизации определялись в диапазоне от нуля до несколько десятых кг/(м×с²).



С учетом изложенного, выражение (1) в обобщенном виде примет вид:

$$G = Q [K_1 h^{-1} - K_2 I + K_3 DI],$$

$$K_1 = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} \frac{c_i}{g} \approx 0.164 c_i,$$

$$K_2 = \frac{\rho_{\text{гр}} \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} [1 + b_1] \approx 1606 [1 - b_1],$$

$$K_3 = \frac{\rho_{\text{гр}} \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} a_1 \approx 1606 a_1.$$

Формула Карима (Karim M.F.) и Кеннеди (Kennedy J.F.). Карим и Кеннеди получили формулу общего расхода наносов (2) через теорию размерностей, поставив в зависимость общего расхода наносов от средней и динамической скорости потока, гидравлической крупности и среднего размера частиц d_{50} , м [Karim, Kennedy, 1983]:

$$G = B \cdot k \left[\frac{v}{\sqrt{g(\rho_{\text{грунта}}/\rho_{\text{воды}} - 1)d_{50}}} \right]^{2.97} \left(\frac{u^*}{\omega} \right)^{1.47} \sqrt{g(\rho_{\text{грунта}}/\rho_{\text{воды}} - 1)d_{50}^3}, \quad (2)$$

где B – ширина потока, м, k – коэффициент пропорциональности, равный 0,00139; d_{50} – размер частиц обеспеченностью 50 %, м; u^* – динамическая скорость, м/с; ω – гидравлическая крупность частиц, м/с.

Гидравлическая крупность ω , м/с определяется по формуле [Караушев, 1960]:

$$\omega = K \sqrt{dg},$$

где K – коэффициент пропорциональности, б/р.

Динамическая скорость рассчитывается как отношение касательного напряжения на границе к плотности воды:

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho_{\text{воды}}},$$

где τ – касательное напряжение на дне, кг/(м×с²).

Касательные напряжения на дне в соответствии с квадратичным законом сопротивления записываются в виде:

$$\tau = -\lambda v |v|,$$

$$\lambda = gn^2 h^{-1/3},$$

где λ – гидравлическое сопротивление на дне реки; n – коэффициент шероховатости русла.

Выделяя основные аргументы формулы и обобщая прочее, выражение (2) примет вид:

$$G = B d^{-2.205} v^{2.44} n^{1.47} h^{0.24} K_1,$$

$$K_1 = \frac{k \cdot K^{-1.47}}{\rho_{\text{в}}^{1.485} g^{0.485} \left(\frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{в}}} - 1 \right)^{0.985}}$$



Формула Энгелунда (Engelund F.) и Хансена (Hansen E.). Полученная в середине прошлого века формула Энгелунда – Хансена (3) имеет вид [Engelund, Hansen, 1967]:

$$G = \rho_{\text{грунта}} \cdot B \frac{0.05|v|^5}{\left(\frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{воды}}} - 1\right) \sqrt{g d_{50} C^3}}, \quad (3)$$

где d_{50} – средний диаметр частиц, м; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с.

Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}.$$

В требуемой записи формула будет (3) иметь вид:

$$G = B |v|^5 d_{50}^{-1} n^3 h^{-0.5} K_1,$$

$$K_1 = 0.05 \rho_{\text{гр}} \frac{1}{\left(\frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{в}}} - 1\right) g^{0.5}} \approx 25.64.$$

Формула Р. Бэгнольда (4) представляет собой полуэмпирическую зависимость [Visser, 1996]:

$$G = \frac{|v|^3}{C^2} \left(0.24 + 0.01 \frac{u^* C}{\omega g^{1/2}} \right) \rho_{\text{воды}}.$$

Проводя процедуру приведения расчетной формулы к обобщенному виду аналогично представленным выше, получим

$$G = K_1 v^3 n^2 h^{-\frac{1}{3}} + K_2 v^4 d_{50}^{-0.5} n^2 h^{-\frac{1}{3}},$$

$$K_1 = 0.24 \rho_{\text{в}} = 240,$$

$$K_2 = 0.01 \rho_{\text{в}}^{0.5} g^{-0.5} K^{-1} \approx 0.1 K^{-1}.$$

Для оценки значимости каждого аргумента (уклона, крупности донных отложений и водности (глубины)) для каждой формулы проведем приблизительную оценку вклада аргументов в расчетную функцию.

Классификация рек. В соответствии с приведенными выше основными критериями соответствия выбора реки-аналога для расчетного водотока (водность, уклон и крупность донных отложений), выявим, какие из этих величин будут являться определяющими для водотоков того или иного типа для каждой расчетной формулы. Ввиду того, что диапазоны изменений аргументов достаточно большие

$$I \in [10^{-7}; 10^{-1}],$$

$$h \in [10^{-1}; 10^2],$$

$$d_{50} \in [10^{-6}; 10^0],$$

следует рассматривать вклад аргументов для отдельных типов рек, разделив последние на группы по следующим признакам: малые, средние, большие и горные, полугорные, равнинные. Различные сочетания указанных признаков позволят сузить диапазоны изменений аргументов (табл. 1). В табл. 1 приведены характерные значения гидравлических переменных состояния рек согласно классификациям (по площади водосбора и по водности,



по уклону, классификация горных рек, классификация по расходу воды, по скорости течения и так далее), представленным в различных литературных источниках [Гагошидзе, 1970; Чалов, 1979; Владимиров и др., 1991; ГОСТ Р 57567-2017]. Дополнить приведенные классификации диапазонами изменения основных гидравлических переменных состояния речного потока позволила информация, приведенная в результатах исследований [Антимонов, 1950; Гагошидзе, 1970; Ржаницын, 1985; Болдаков, 1993; Бутаков и др., 1996; Чалов, 2017].

Таблица 1
Table 1

Характерные значения гидравлических переменных состояния рек разных типов для среднего периода водности
Characteristic values of hydraulic variables of the state of rivers of different types for the average water content period

Классификация рек	Показатели			
	F , км ²	I	h , м	v , м/с
Равнинные реки, $I \leq 0,0005$				
очень малые	≤ 200	$> 0,001$ ил, песок, галька	$< 0,5$	$< 0,2$
малые	200–2000	0,0001–0,004 ил, песок, галька	0,5–1,5	
средние	2000–50000	0,00015–0,0006 ил, песок, галька	0,7–2,5	0,2–1
большие	≥ 50000	0,00005–0,0001 ил, песок, галька	$> 2,5$	> 1
Полугорные реки, $I \in (0,0005; 0,005)$				
малые	≤ 50	$> 0,005$ песок, гравий, галька	$< 0,5$	1,3–3
средние	50–800	0,0005–0,005 песок, гравий, галька	0,5–2	
большие	≥ 800	0,0003–0,005 песок, гравий, галька	> 2	
Горные реки, $I \geq 0,005$				
малые	≤ 50	$> 0,1$ камни, глыбы	$< 0,5$	2,5–5
средние	50–800	0,01–0,1 галька, камни	0,5–2	
большие	≥ 800	0,005–0,014 песок, гравий, галька, камни	> 2	

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим вклад основных аргументов формул 1–4 для средних значений гидравлических переменных состояния по диапазонам их изменений для каждой группы рек. Для формул аддитивного типа, которому соответствует аналитическая формула расхода наносов (1) уместно оценить вклад слагаемых (с учетом их степенных функций аргументов и коэффициентов) в относительных единицах.

В табл. 2 приведены вычисленные значения степенных функций аргументов и их вклад в расчет общего расхода наносов в формуле (1) для равнинных рек.



Согласно полученным результатам (см. табл. 2), для малых и средних рек равнинного типа значимость аргументов в формуле (1) равноценна. Для больших равнинных рек преимущественное значение имеет соответствие водности рек.

Таблица 2
Table 2

Вклад вычисленных значений степенных функций аргументов в аналитической формуле расхода наносов (1) для равнинных рек
 Contribution of the calculated values of the power functions of the arguments in the analytical formula of sediment flow (1) for plain rivers

Типизация рек	Значения степенных функций аргументов формулы		Значения слагаемых формулы (1)		Вклад аргументов, %	
	I	h	$I(-K_2 - K_3 D)$	$K_1 h^{-1}$	I	h
Малые	10^{-3}	$h^{-1} = 0,5^{-1} = 2$	0,324	0,166	66	34
Средние	10^{-1}	$h^{-1} = 2^{-1} = 0,5$	0,0324	0,0414	44	56
Большие	10^{-5}	$h^{-1} = 6^{-1} = 0,17$	0,00324	0,014	19	81

Для оценки вклада аргументов в формулах мультипликативного вида уместно принимать во внимание порядок (значения степени) уже вычисленных значений степенных функций аргументов. Рассмотрим подробно вклад аргументов формул (2)–(4) для равнинных рек (табл. 3). Формула Бэгнольда (4) имеет смешанный тип, но порядок степеней основных аргументов в каждом из слагаемых схож. Это дает основание провести оценку вклада по одному из слагаемых, например, по второму.

Таблица 3
Table 3

Вклад вычисленных значений степенных функций аргументов в формулах (2)–(4) для равнинных рек
 Contribution of calculated values of power functions of arguments in formulas (2)–(4) for plain rivers

Типизация рек	Значения степенных функций аргументов формулы			Вклад аргументов		
	v	d_{50}	h	v	d_{50}	h
Формула Карима-Кеннеди (2)						
Малые	$v^{4.4} = 0,1^{4.4} = 4 \times 10^{-5}$	$(d_{50})^{-2.205} = 0,00075^{-2.205} = 10^7$	$h^{-0.245} = 0,5^{-0.245} = 1,2$	10^{-5}	10^7	10^0
Средние	$v^{4.4} = 0,6^{4.4} = 0,1$	$(d_{50})^{-2.205} = 0,00075^{-2.205} = 10^7$	$h^{-0.245} = 2^{-0.245} = 0,84$	10^{-1}	10^7	10^{-1}
Большие	$v^{4.4} = 2^{4.4} = 22$	$(d_{50})^{-2.205} = 0,00075^{-2.205} = 10^7$	$h^{-0.245} = 6^{-0.245} = 0,64$	10^1	10^7	10^{-1}
Формула Энгелунда-Хансена (3)						
Малые	$v^5 = 0,1^5 = 10^{-5}$	$(d_{50})^{-1} = 0,00075^{-1} = 10^3$	$h^{-0.5} = 0,5^{-0.5} = 1,4$	10^{-5}	10^3	10^0
Средние	$v^5 = 0,6^5 = 0,08$	$(d_{50})^{-1} = 0,00075^{-1} = 10^3$	$h^{-0.5} = 2^{-0.5} = 0,71$	10^{-2}	10^3	10^{-1}
Большие	$v^5 = 2^5 = 32$	$(d_{50})^{-1} = 0,00075^{-1} = 10^3$	$h^{-0.5} = 6^{-0.5} = 0,41$	10^1	10^3	10^{-1}
Формула Бэгнольда (4)						
Малые	$v^4 = 0,1^4 = 10^{-4}$	$(d_{50})^{-0.5} = 0,00075^{-0.5} = 36$	$h^{-1.3} = 0,5^{-1.3} = 1,26$	10^{-4}	10^1	10^0
Средние	$v^4 = 0,6^4 = 0,13$	$(d_{50})^{-0.5} = 0,00075^{-0.5} = 36$	$h^{-1.3} = 2^{-1.3} = 0,79$	10^{-1}	10^1	10^{-1}
Большие	$v^4 = 2^4 = 16$	$(d_{50})^{-0.5} = 0,00075^{-0.5} = 36$	$h^{-1.3} = 6^{-1.3} = 0,55$	10^1	10^1	10^{-1}



Таким образом, аргументами с наибольшей по модулю степенью в формулах (2) и (3) для малых рек являются кинематические показатели – средняя скорость потока и средняя крупность донных отложений. При этом для средних и больших равнинных рек значимость средней крупности донных отложений в этих формулах становится определяющей. В формуле Бэгнольда (4) для средних и больших равнинных рек вклад всех аргументов равноценен, тогда как для малых рек наиболее веский вклад в расчеты привносит средняя скорость потока.

Интересно заметить, что для формулы Карима-Кеннеди (2) существенный вклад (степень седьмого порядка) в расчеты привносит значение средней крупности донных отложений d_{50} . Принимая во внимание то, что эта величина в русловых потоках характеризуется очень широким диапазоном значений, ее оценка сопряжена с определенной погрешностью [Лепихин, Возняк, 2020]. В свою очередь, это обуславливает существенный вклад в погрешности расчетов по данной формуле.

В табл. 4 приведены результаты, полученные по аналогии с приведенным выше анализом (см. табл. 3) для всех формул по всем группам рек. Здесь представлены результаты оценки вклада вычисленных значений степенных функций аргументов рассматриваемых формул. Соответствие приведенных аргументов будет определяющим при назначении рек-аналогов для расчетов расхода наносов.

Таблица 4
Table 4

Вклад аргументов в расчетных формулах общего расхода наносов для разных типов рек
Contribution of arguments in the calculation formulas of the total sediment runoff
for different types of rivers

Типы рек	Формула			
	1	2	3	4
Равнинные реки				
Малые	I, D, h	v, d_{50}	v, d_{50}	v
Средние	I, D, h	d_{50}	v, d_{50}, h	v, d_{50}, h
Большие	h	d_{50}	v, d_{50}, h	v, d_{50}, h
Полугорные реки				
Малые	I, D	d_{50}	v, d_{50}, h	v, d_{50}, h
Средние	I, D	d_{50}	v, d_{50}, h	v, d_{50}, h
Большие	I, D	d_{50}	v, d_{50}, h	v, d_{50}, h
Горные реки				
Малые	I, D	v, d_{50}	v	v
Средние	I, D	v, d_{50}	v	v
Большие	I, D	v, d_{50}	v	v

Согласно результатам оценки вклада основных аргументов в формулы расхода наносов (1)–(4) для рек горного и полугорного типов выявлены следующие закономерности. Для горных рек значимый вклад во всех формулах ожидаемо привносят кинематические аргументы – скорость и крупность донных отложений. Аналогично ситуация обстоит для полугорных рек в оценках для формул (1) и (2). В формулах (3) и (4) для полугорных рек вклад аргументов относительно равноценен.

Заключение

Вне всякого сомнения, приведенные расчеты значимости вклада того или иного аргумента в оценки соответствия реки-аналога и исследуемого водотока в расчетах по формулам расхода наносов несколько условны. И прежде всего эта условность определяется приведенными в табл. 1 значениями переменных состояния потока для выделенных групп



рек. Эти данные получены из различных источников, не везде согласованы между собой и в ряде случаев являются приблизительными. Помимо этого, значительные диапазоны изменения переменных состояния речного потока в пределах одной группы в несколько порядков также могут приносить неточности в оценке вклада аргументов в расчетной формуле.

При этом если располагать данными наблюдений за гидравлическими переменными состояния потока (глубиной, скоростью, уклоном) исследуемой реки и возможных для этого водотока рек-аналогов, то оценка вклада аргументов расчетных формул позволит определить наилучшее соответствие без отмеченных выше недостатков.

Таким образом, представленный метод может служить ориентиром в назначении реки-аналога для расчетов по приведенным формулам общего расхода наносов при полном отсутствии данных наблюдений за гидравлическими переменными состояния потока исследуемой реки. При наличии эпизодических данных наблюдений, приведенные оценки позволят определиться с выбором реки-аналога для последующих расчетов с большей точностью.

Список источников

- ГОСТ Р 57567-2017. Определение гидроморфологических показателей состояния рек. Национальный стандарт Российской Федерации. Качество воды. 2017. М., Стандартинформ, 16 с.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. 2009. Под ред. А.В. Рождественского. Санкт-Петербург, Нестор-история, 194 с.
- СНИП 2.05.03-84. «Мосты и трубы». По изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМ П—91). Проектный конструкторско-технологический институт транспортного строительства. 1992. М., 425 с.
- СП 58.13330.2012. Свод правил по проектированию и строительству. Гидротехнические сооружения. Основные положения. 2012. М.
- СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. 2004. М.
- Чалов Р.С. 2017. Русловые процессы (русловедение). М., Инфра-М, 569 с.

Список литературы

- Антимонов Н.А. 1950. Исследования малых рек. Л., Гидрометеиздат, 128 с.
- Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. 2021. Влияние изменения коэффициента шероховатости русла на максимальные расчетные уровни малого водотока в заданном створе (на примере р. Нельма). Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 4 (49): 74–80. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/74-80.
- Бабков В.Ф., Быковский Н.И., Гербург-Гейбович А.В., Тулаев А.Я. 1950. Грунтоведение и механика грунтов. М., Дориздат, 334 с.
- Болдаков Е.В. 1993. Жизнь рек. М., Государственное издательство технико-теоретической литературы, 64 с.
- Бутаков Г.П., Голосов В.Н., Дедков А.П., Кичигин А.Н., Мозжерин В.И., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. 1996. Малые реки как наиболее уязвимое звено речной сети. Эрозионные и русловые процессы, 2: 56–70.
- Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. 1991. Охрана окружающей среды. Л., Гидрометеиздат, 424 с.
- Гагарина О.В. 2011. Минимальные расходы воды в нормативно-методической базе России: специфика расчетов минимального стока малых рек при отсутствии данных наблюдений. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 1: 18–26.



- Гагошидзе М.С. 1970. Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, Сабизта сакартвело, 386 с.
- Карасев И.Ф. 1975. Русловые процессы при переброске стока. Л., Гидрометеиздат, 288 с.
- Карасев И.Ф., Коваленко В.В. 1994. Статистические методы речной гидравлики и гидрометрии. СПб., Гидрометеиздат, 208 с.
- Караушев А.В. 1960. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л., Гидрометеиздат, 390 с.
- Косиченко Ю.М. 2020. Обобщение данных по шероховатости русел каналов в земляном русле и облицовке. Экология и водное хозяйство, 2 (5): 155–168. DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-155-168.
- Космаков И.В., Космаков В.И., Петров В.М., Дурнев В.Ф. 2013. Региональная методика расчёта годового и максимального стока рек северной части Енисейского края. Инженерные изыскания, 1: 56–59.
- Лепихин А.П., Возняк А.А. 2020. К проблеме оценки транспорта наносов. Географический вестник, 4 (55): 125–136. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136.
- Лобанов В.А., Никитин В.Н. 2006. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов. Метеорология и гидрология, 11: 60–69.
- Лохтин В.М. 1895. О механизме речного русла. Казань, типография Б.Л. Домбровского, 76 с.
- Ржаницын Н.А. 1985. Руслоформирующие процессы рек. Л., Гидрометеиздат, 263 с.
- Срибный М.Ф. 1932. Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов. М.–Л., Гострансиздат, 148 с.
- Чалов Р.С. 1979. Географические исследования русловых процессов. М., МГУ, 232 с.
- Шмакова М.В. 2020. Методология решения геоэкологических задач, связанных с оценкой твердого стока водных объектов. Автореф. дис. ... док. геогр. наук. СПб., 48 с.
- Шмакова М.В. 2018. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб., Издательство ВВМ, 1495 с.
- Arcement G.J., Schneider V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological survey water-supply paper 2339, 44 p.
- Barnes H. 1967. Roughness Characteristics of Natural Channels. Washington, United States government printing office, 219 p.
- Cai M., Yang S., Zhao C., Zhou Q., Hou L. 2017. Insight into runoff characteristics using hydrological modeling in the data-scarce southern Tibetan Plateau: Past, present, and future. Plos one, 12 (5): e0176813. DOI: 10.1371/journal.pone.0176813.
- Chow V.T. 1959. Open channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, 350 p.
- Dahe P.D., Deshmukh B.B. 2018. Estimation of annual runoff in indravatisub basin of godavari river using statistical approach. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 5 (5): 167–175. doi: 10.26562/IJIRAE.2018.MYAE10079.
- Engelund F., Hansen E.A. 1967. A monograph on Sediment transport in Alluvial Streams. Copenhagen, Nordic Hydrology, 62.
- Heritage G.L., Moon B.P., Broadhurst L.J., James C.S. 2004. The frictional resistance characteristics of a bedrock-influenced river channel. Earth Surface Processes and Landforms, 29 (5): 611–627. DOI: 10.1002/esp.1057.
- Karim M.F., Kennedy J.F. 1983. Computer-based Predictors for Sediment Discharge and Friction Factor of Alluvial Streams. Proc. Second International Symposium on River Sedimentation, 219–233.
- Melis M., Poggi D., Fasanella G.O., Cordero S., Katul G.G. 2019. Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break. Water Resources Research, 31 (2): 274–292. DOI: 10.1029/2018WR023889.
- Visser P.J. 1996. Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion. Oceanographic Literature Review 9 (43): 954.



References

- Antimonov N.A. 1950. Issledovaniya malykh rek [Studies of small rivers]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 128 p.
- Ahmedova N.R., Naumov V.A. 2021. Influence of the channel roughness factor change on the maximal design levels of a small watercourse in a given river cross (Nelma river example). FEFU: School of Engineering Bulletin, 4 (49): 74–80 (in Russian). DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/74-80.
- Babkov V.F., Bykovskii N.I., Gerburt-Geibovich A.V., Tulaev A.Ya. 1950. Gruntovedenie i mekhanika gruntov [Soil science and soil mechanics]. Moscow, Publ. Dorizdat, 334 p.
- Boldakov E.V. 1993. Zhizn' rek [Life of the rivers]. Moscow, Publ. Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 64 p.
- Butakov G.P., Golosov V.N., Dedkov A.P., Kichigin A.N., Mozzherin V.I., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. 1996. Malye reki kak naibolee uyazvimoe zveno rechnoi seti [Small rivers as the most vulnerable link of the river network]. Erozionnye i ruslovye protsessy, 2: 56–70.
- Vladimirov A.M., Lyakhin Yu.I., Matveev L.T., Orlov V.G. 1991. Okhrana okruzhayushchey sredy [Environmental protection]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 424 p.
- Gagarina O.V. 2011. Low-Water Discharges in the Regulatory-Methodological Base of Russia: the Specific Character of Calculation of Minimum River Drains in the Absence of Observations Data. Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences, 1: 18–26 (in Russian).
- Gagoshidze M.S. 1970. Selevye yavleniya i bor'ba s nimi [Mudflow phenomena and the fight against them]. Tbilisi, Publ. Sabieta sakartvelo, 386 p.
- Karasev I.F. 1975. Ruslovye processy pri perebroske stoka [Channel processes during the transfer of runoff]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 288 p.
- Karasev I.F., Kovalenko V.V. 1994. Statisticheskie metody rechnoj gidravliki i gidrometrii [Statistical methods of river hydraulics and hydrometry]. Saint Petersburg, Publ. Gidrometeoizdat, 208 p.
- Karashev A.V. 1960. Problemy dinamiki estestvennykh vodnykh potokov [Problems of dynamics of natural water flows]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 390 p.
- Kosichenko Yu.M. 2020. Integrating Data on Canal Bed Roughness in Earthen Channel and Lining. Ecology and water management, 2 (5): 155–168 (in Russian). DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-155-168.
- Kosmakov I.V., Kosmakov V.I., Petrov V.M., Durnev V.F. 2013. Regional Calculation Method for the Annual and Maximum River Runoff in the Northern Part of the Yenisey Ridge. Engineering surveys, 1: 56–59 (in Russian).
- Lepikhin A.P., Wozniak A.A. 2020. On the Problem of Sediment Transport Assessment. Geographical bulletin, 4 (55): 125–136 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136.
- Lobanov V.A., Nikitin V.N. 2006. Regional Models for Determination of Design Maximum Runoff Versus Hydrographic Factors of Watersheds. Meteorology and Hydrology, 11: 60–69 (in Russian).
- Lokhtin V.M. 1895. O mekhanizme rechnogo rusla [About the mechanism of the riverbed]. Kazan', Publ. B.L. Dombrovskogo, 76 p.
- Rzhanitsyn N.A. 1985. Rusloformiruyushchie protsessy rek [Channel-forming processes of rivers]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 263 p.
- Sribnyi M.F. 1932. Normy soprotivleniya dvizheniyu estestvennykh vodotokov i raschet otverstii bol'shikh mostov [Norms of resistance to the movement of natural watercourses and the calculation of the openings of large bridges]. Moscow–Leningrad, Publ. Gostransizdat, 148 p.
- Chalov R.S. 1979. Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov [Geographical studies of riverbed processes]. Moscow, Publ. MGU, 232 p.
- Shmakova M.V. 2020. Metodologiya resheniya geoeologicheskikh zadach, svyazannykh s ochenkoj tverdogo stoka vodnykh ob"ektov [Methodology for solving geoeological problems related to the assessment of solid runoff of water bodies]. Abstract. dis. ... doc. geogr. sciences. Saint Petersburg, 48 p.
- Shmakova M.V. 2018. Calculations of Solid River Flow and Siltation of Reservoirs. Saint Petersburg, Publ. VVM, 145 p.
- Arcement G.J., Schneider V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological survey water-supply paper 2339, 44 p.



- Barnes H. 1967. Roughness Characteristics of Natural Channels. Washington, United States government printing office, 219 p.
- Cai M., Yang S., Zhao C., Zhou Q., Hou L. 2017. Insight into runoff characteristics using hydrological modeling in the data-scarce southern Tibetan Plateau: Past, present, and future. Plos one, 12 (5): e0176813. DOI: 10.1371/journal.pone.0176813.
- Chow V.T. 1959. Open channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, 350 p.
- Dahe P.D., Deshmukh B.B. 2018. Estimation of annual runoff in indravatisub basin of godavari river using statistical approach. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 5 (5): 167–175. doi: 10.26562/IJIRAE.2018.MYAE10079.
- Engelund F., Hansen E.A. 1967. A monograph on Sediment transport in Alluvial Streams. Copenhagen, Nordic Hydrology, 62.
- Heritage G.L., Moon B.P., Broadhurst L.J., James C.S. 2004. The frictional resistance characteristics of a bedrock-influenced river channel. Earth Surface Processes and Landforms, 29 (5): 611–627. DOI: 10.1002/esp.1057.
- Karim M.F., Kennedy J.F. 1983. Computer-based Predictors for Sediment Discharge and Friction Factor of Alluvial Streams. Proc. Second International Symposium on River Sedimentation, 219–233.
- Melis M., Poggi D., Fasanella G.O., Cordero S., Katul G.G. 2019. Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break. Water Resources Research, 31 (2): 274–292. DOI: 10.1029/2018WR023889.
- Visser P.J. 1996. Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion. Oceanographic Literature Review 9 (43): 954.

*Поступила в редакцию 14.01.2022;
поступила после рецензирования 03.02.2022;
принята к публикации 14.02.2022*

*Received January 14, 2022;
Revised February 3, 2022;
Accepted February 14, 2022*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шмакова Марина Валентиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования Института озераедения РАН Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina V. Shmakova, Doctor of Geography, Leading Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of the Institute of Limnology RAS of the St. Petersburg Federal Research Center RAS, St. Petersburg, Russia