

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862

## METHOD FOR DETERMINING THE BED LOAD DISCHARGE BY THE PARAMETER OF THE AVERAGE DEPTH OF THE LAYER OF MOVING MATERIAL

**R. V. Zavarzin, V. M. Katolikov**

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

*The object of the study in this paper is the dunes form of transport of bed load in the channels of lowland navigable rivers. An accurate assessment of the bed load discharge is important when considering river morphology, conducting dredging and river regulation works to ensure navigational conditions, as well as when designing various engineering structures. This paper analyzes modern methods for measuring bed load discharge based on dune parameters. Considering the identified shortcomings and limitations of existing measurement methods, a new method for measuring bed load discharge is proposed. A distinguishing feature of the proposed method is the use of the average depth of the layer of moving material when determining bed load discharge. This parameter is defined as the ratio of the area of the moving material to the length of the moving material layer. Essentially, the moving material consists of dunes identified after filtering out minor bottom protrusions. The advantage of this method lies in using of the average depth of the moving material layer, which allows for all the dunes identified in the longitudinal profile to be accounted for when calculating the bed load discharge. The use of areal dune characteristics also enables the determination of bed load discharge in rivers where the bottom relief consists of deficit dunes. To confirm the effectiveness of this method, a series of experiments were conducted in the Channel Laboratory of the State Hydrological Institute in hydraulic flumes with a movable sand bed. The channel bedforms consisted of three-dimensional dunes. The flow regime in the flume was adjusted to replicate conditions typical of lowland navigable rivers. The experiments confirmed that even with the complex three-dimensional structure of the channel bedforms, the proposed method is highly accurate compared to existing methods.*

*Keywords: bed load discharge, the dunes form of transport of bed load, measurement methods, three-dimensional dunes, experimental studies of bed load transport, deficit dunes.*

**For citation:**

Zavarzin Ruslan V. and V. M. Katolikov. "Method for determining the bed load discharge by the parameter of the average depth of the layer of moving material" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 847–862. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

**УДК 556.537**

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ ПО ПАРАМЕТРУ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ СЛОЯ ПОДВИЖНОГО МАТЕРИАЛА

**Р. В. Заварзин, В. М. Католиков**

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В настоящей работе объектом исследования является грядовая форма движения донных наносов в руслах равнинных судоходных рек. Отмечается, что объективная оценка расхода донных наносов важна при рассмотрении морфологии рек, проведении дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения условий судоходства, а также при строительстве различных инженерных сооружений. В представленной работе выполнен анализ современных методов измерения расхода наносов по параметрам гряд. Учитывая недостатки и ограничения существующих методов измерения, предложен новый метод измерения расхода донных наносов. Отличительной чертой предлагаемого метода является использование параметра средней мощности слоя подвижного материала при определении расхода наносов. Данный параметр является отношением площади подвижного материала к длине слоя подвижного материала. По сути, подвижным*

материалом являются донные гряды, выделенные после проведения фильтрации малых выступов дна. Подчеркивается, что преимуществом предлагаемого метода является использование параметра средней мощности слоя подвижного материала, благодаря чему при вычислении расхода учитываются все гряды, выделенные на продольном профиле. Благодаря использованию площадной характеристики гряд становится возможным определение расхода донных наносов в реках с донным рельефом, состоящем из дефицитных гряд. Для подтверждения эффективности данного метода в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института была проведена серия экспериментов в гидравлических лотках с песчаным подвижным дном. Русловой рельеф состоял из трехмерных гряд. Режим течения в лотке был приближен к режиму в руслах равнинных судоходных рек. Исследования подтвердили, что даже при такой сложной трехмерной структуре руслового рельефа применяемый метод является весьма точным по сравнению с другими известными методами.

*Ключевые слова:* расход донных наносов, грядовая форма, движение наносов, методы измерения, трехмерные гряды, транспорт донных наносов, дефицитные гряды.

**Для цитирования:**

Заварзин Р. В. Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 847–862. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-847-862.

### **Введение (Introduction)**

Объективная оценка расхода донных наносов в руслах равнинных судоходных рек важна при выполнении многих практических задач (например, для составления прогноза по переформированиям донного рельефа, для составления плана по улучшению судоходных условий). В частности, корректная оценка величины расхода донных наносов необходима для проведения дноуглубительных и выправительных работ и при строительстве различных инженерных сооружений. Точное измерение расхода донных наносов при их грядовой форме движения остается сложной задачей в особенности в руслах рек со сложным трехмерным рельефом.

В современной практике существует множество методов измерения расхода донных наносов, основанных на использовании параметра, определяющего высоту перемещающейся области руслового рельефа на продольном профиле [1]–[3]. Согласно этому подходу расход донных наносов рассматривается как функция высоты и скорости перемещения гряд. По средним параметрам гряд, определенным на продольных профилях руслового рельефа, находится элементарный расход донных наносов. В этом случае под элементарным расходом подразумевается площадь донных наносов, перемещаемая потоком на вертикали за единицу времени.

Полный расход наносов, осредненный по длине участка реки, находится путем интегрирования элементарных расходов по ширине участка. На основе данного подхода было сформулировано множество конкретных способов определения расхода наносов, различающихся по способу измерения характеристик перемещающейся области руслового рельефа. В настоящей работе выполнен анализ существующих методов измерения. Учитывая найденные преимущества и недостатки существующих методов, предлагается новый метод измерения, основанный на использовании параметра средней мощности слоя подвижного материала. Для проверки точности разработанного метода проведены экспериментальные исследования в гидравлических лотках в Русловой лаборатории ГГИ. Результаты исследования показали высокую точность разработанного метода в условиях, когда русловой рельеф состоит из трехмерных гряд, а режим потока соответствует условиям равнинных судоходных рек.

Задачи данного исследования:

1. Выполнить анализ существующих методов измерения расхода донных наносов, найти в них недостатки и ограничения, которые могут приводить к ошибкам в получаемой величине расхода.
2. Разработать новый метод измерения, учитывающий преимущества и недостатки существующих методов.

3. Выполнить экспериментальную проверку точности разработанного метода измерений расхода донных наносов при режиме потока, приближенном к условиям равнинных судоходных рек.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Методы, основанные на использовании высоты гряд в явном виде.* В отечественной практике наиболее распространенным является метод, разработанный в Государственном Гидрологическом институте, который представлен в Руководящем документе РД 52.08.163–88. Согласно этому методу высота гряды определяется как разность между высотными отметками гребня гряды и нижнего по течению подваля. Длина гряды определяется как расстояние между гребнями двух соседних гряд. На практике (например, при трехмерном хаотичном характере грядового рельефа) чаще всего параметры гряд определяются по нескольким избранным грядам.

Скорость движения гряд определяется по смещению характерных точек гряд. По гребням нескольких гряд устойчивой продольной формы определяется их среднее смещение за временной интервал между съемками. Для получения скорости гряд расстояние смещения гряд делится на временной интервал между измерениями. Коэффициент формы гряд по умолчанию принимается равным 0,6. Использование коэффициента формы гряд позволяет исключить площадь пустот между грядами и перейти к площади транспортирующихся донных наносов. Итоговый расход наносов рассчитывается по средним значениям высот и скоростям гряд устойчивой продольной формы:

$$q_{\text{эле}} = \alpha h_{\text{г}} C_{\text{г}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{эле}}$  — элементарный расход наносов;

$\alpha$  — коэффициент формы гряд;

$h_{\text{г}}$  — высота гряд;

$C_{\text{г}}$  — скорость смещения гряд.

Недостатком такого метода является неопределенность в выборе измеряемых гряд, приводящая на практике к субъективизму при их выборе. Также постоянный коэффициент формы гряд не позволяет учесть всю сложность строения руслового рельефа. В итоге указанные недостатки приводят к ошибкам в получаемой величине расхода донных наносов.

Другой наиболее известный отечественный метод измерения расхода донных наносов разработан в МГУ А. Ю. Сидорчуком [4] и Н. И. Алексеевским [5], предложившими иерархическую классификацию русловых форм. Согласно их классификации, структура руслового рельефа состоит из пяти типов гряд, расположенных в иерархичном порядке. Расход донных наносов определяется для каждого активного типа гряд по формуле (1). Полный расход наносов получают путем суммирования расходов, полученных для каждого активного типа гряд. Недостатком такого подхода является неопределенность в выборе активных типов гряд. При возможной ошибке в их определении вычисленный полный расход донных наносов может превышать фактический расход в несколько раз. Следует отметить, что в других методах, рассматриваемых в настоящей работе, для определения расхода наносов используются только параметры одного типа гряд. Исходя из этого возникает вопрос о целесообразности использования каких-либо дополнительных типов гряд, кроме донных (по определению ГГИ).

Один из наиболее современных отечественных методов измерений, разработанный А. А. Костюченко [6], характеризуется применением статистических приемов обработки руслового рельефа. Вначале выполняется фильтрация выступов дна. Для этого из профиля исключаются незначительные выступы, мерой значимости служит величина, кратная среднеквадратическому отклонению отметок точек на профиле, определяемому методом последовательных разностей. Высота всех оставшихся на продольном профиле гряд учитывается при расчете их средней высоты. Коэффициент формы определяется для каждого продольника отдельно. Оценка среднего смещения гряд выполняется по характеристикам пространственно-временной корреляции высотных отметок последовательно снятых продольных профилей. Полный

расход наносов на всем участке реки находится путем интегрирования элементарных расходов по ширине участка.

Недостатком этого метода является то, что для выделения гряд на профиле используется величина, кратная среднеквадратическому отклонению. Из научной литературы по теме [7] известно, что высота гряд зависит от характеристик потока на участке реки, тогда как среднеквадратическое отклонение является статистическим параметром, определяемым по массиву измеренных высотных отметок дна. Так, в зависимости от точности измерений (количества измеренных отметок дна на единицу длины продольного профиля) среднеквадратическое отклонение на одном и том же участке реки может иметь разные значения. Таким образом, непредсказуемость среднеквадратического отклонения может приводить к некорректному выделению гряд и в конечном итоге к неточностям в получаемой величине расхода донных наносов.

Среди методов, разработанных за рубежом, известным является метод, описанный в статье Г. Гаумана и Р. Б. Якобсона [8], где высота гряд определяется как разность между уровнем гребня и средним уровнем верхнего и нижнего подвалей. Расход наносов вычисляется по формуле (1) для каждой отдельной гряды. Полный расход донных наносов рассчитывается исходя из средневзвешенных расходов каждой отдельной гряды, при этом весом гряды является ее длина. Недостатком описываемого метода является отсутствие каких-либо конкретных рекомендаций о выборе измеряемых гряд. При субъективном выборе измеряемых гряд расход может быть как завышен, так и занижен относительно фактических значений.

*Методы, основанные на использовании иных параметров гряд.* По мере широкого распространения современных компьютерных программ и современного оборудования для измерения рельефа русла начали разрабатываться методы, использующие иные параметры гряд для определения расхода донных наносов. В частности, была разработана и исследована методика измерения расхода донных наносов — ISSDOT (Integrated Section Surface Difference Over Time) [9], [10]. Предлагаемый способ основан на сопоставлении последовательно измеренных планов русла и измерении областей размыва гряд. Два 3D плана руслового рельефа разделяются на несколько полос и совмещаются между собой. Далее измеряются объемы размыва напорного склона гряд и между ними находится среднее для каждой полосы.

Расход донных наносов вычисляется по формуле (2), которая является модификацией формулы (1). Скорость гряд представляется как отношение расстояния к времени сдвига. В свою очередь произведение высоты гряд, расстояния сдвига и ширины полосы представляется как объем размыва напорного склона гряд. Вычисление расхода выполняется для полосы заданной ширины. Формула расхода донных наносов приобретает вид

$$Q_{\text{плс}} = a\Delta V / \Delta t, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{плс}}$  — расход наносов в полосе;

$\Delta V$  — объем размыва напорного склона гряд;

$\Delta t$  — временной интервал между измерениями рельефа.

Коэффициент формы гряды, согласно исследованиям А. Уилберса [11], рекомендуется брать равным 0,57. Полный расход донных наносов на участке реки вычисляется путем суммирования расходов во всех полосах. Недостатком данного способа является то, что при сложном трехмерном строении руслового рельефа корректно измерить объем размыва гряд можно лишь по некоторым избранным грядам, перемещенным на расстояние, не превышающее половину своей длины, тогда как при сложном строении руслового рельефа многие другие гряды перемещаются на расстояние, близкое к их длине или даже превышающее ее. В этом случае измерить объем размыва невозможно. Таким образом, определение расхода выполняется лишь по наибольшим по размеру грядам, что приводит к неоправданному завышению расхода донных наносов.

Еще один метод, применяемый Д. Гауманом и Р. Б. Якобсоном, изложенный в работе [8], заключается в определении высоты гряды по ее площади. Для этого на продольном профиле выделяются подвалья гряд, соединяемые прямыми линиями. Высота гряд вычисляется путем деления площади

гряды над линией подвалей на длину этой линии. В данном случае вместо высоты гряды используется отметка средней линии гряды, и уравнение (1) применяется без коэффициента формы гряды. Скорость смещения гряд определяется по смещению гребней. Тема выбора измеряемых гряд в данном методе не раскрывается.

Перспективным направлением измерения расхода донных наносов является метод, разработанный Ж. А. Ниттруэром, М. А. Эллисоном и Р. Кампанеллой [12]. На плане русла выделяются полигоны размерами порядка нескольких гряд. На каждом полигоне выделяются гряды, на которых измеряется объем аккумуляции наносов. Для определения скорости движения гряд сумма площадей аккумуляции делится на число гряд и ширину полигона. Элементарный расход наносов вычисляется как произведение среднего горизонтального смещения на среднее вертикальное смещение, деленное на время между съемками. Одним из его главных преимуществ является возможность получения картины планового распределения расхода донных наносов по всему участку измерений. Однако выделение точного количества гряд на полигоне может быть затруднено ввиду сложного характера рельефа.

Ограничением в большинстве описанных методов является то, что при русловом рельефе, состоящем из «дефицитных» гряд, их применение становится некорректным. Особенность дефицитных гряд состоит в наличии на продольных профилях между грядами обширной зоны, незаполненной подвижными донными наносами, где расход донных наносов равен нулю. Такой характер транспорта донных наносов в форме «дефицитных» гряд наблюдается в руслах многих судоходных рек, например, в русле р. Невы [13]. Все описанные методы, кроме метода, разработанного Ж. А. Ниттруэром и др. [12], не позволяют учитывать такую особенность строения руслового рельефа. Таким образом, применение описываемых методов в данных условиях может приводить к завышению величины расхода донных наносов.

Некоторые из описанных ранее способов были исследованы экспериментально в рамках работы [1]. На основе экспериментальных данных, полученных в гидравлических лотках, были применены: классический метод ГГИ, метод ISSDOT и метод А. А. Костюченко. В результате было обнаружено, что метод А. А. Костюченко имеет наилучшую точность (ошибка составила 22,25 % и 5,25 % с использованием поправочного коэффициента), тогда как методы ГГИ и ISSDOT имеют ошибки 53,2 % и 40,6 % соответственно. В работе сделан вывод о том, что метод А. А. Костюченко оказался наиболее точным благодаря применению фильтрации малых выступов дна и учету параметров всех гряд, находящихся на продольном профиле.

Большинство описанных методов основано на измерении параметров гряд и скорости их смещения. Итоговый расход наносов при этом считается по средним параметрам гряд (высоте, площади размыва, длине и площади гряд), но часто определение таких параметров бывает затруднено ввиду сложного характера руслового рельефа, где одновременно присутствуют гряды очень разного размера. Из этого следует, что при измерении расхода необходимо проведение специальной фильтрации выступов дна с целью корректного выделения донных гряд. Таким образом, будут учтены все гряды, выделенные на продольниках.

Исходя из выполненного анализа можно сделать вывод о том, что все современные методы измерения расхода имеют те или иные недостатки и ограничения, в результате чего появляется необходимость в разработке нового метода измерения, позволяющего повысить точность измерения расхода. Также необходима разработка метода, позволяющего измерять расход при русловом рельефе, состоящем из дефицитных гряд.

*Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала.* Данный метод, разработанный в рамках настоящей работы, основан на определении расхода донных наносов исходя из величины средней мощности слоя подвижного материала [14]. Рассмотрим упрощенную схему руслового рельефа, как показано на рис. 1. Согласно этой схеме, русловый рельеф состоит из нескольких гряд разного размера. При этом движущиеся донные наносы (подвижный материал) ограничены сверху линией поверхности гряд, а снизу линией подвалей гряд. Вводится предположение о том, что критерием расхода донных наносов является средняя мощность слоя подвижного материала. Получение этой характеристики осуществляется делением площади всего слоя подвижного материала на длину линии подвалей гряд.

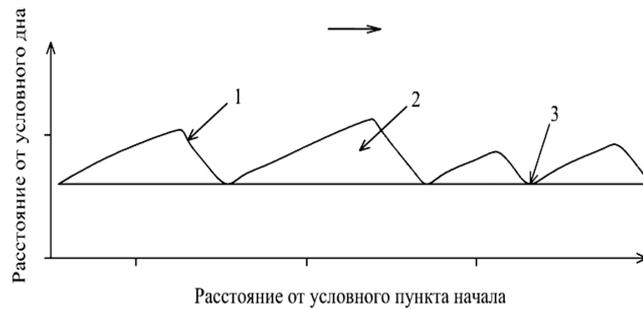


Рис. 1. Упрощенная схема руслового рельефа: 1 — поверхность гряд; 2 — слой подвижного материала (сумма площадей гряд); 3 — подвалья гряд

В данном случае уравнение (1) следует использовать без коэффициента формы гряды, так как средняя мощность подвижного материала исключает область пустот:

$$q_{\text{эле}} = (1 - p)h_{\text{под.мат}} C_r \quad (3)$$

Для реализации описываемого метода необходимо предварительное измерение рельефа русла реки. Длина измеряемого участка реки должна быть достаточной, чтобы каждый продольный профиль дна русла включал минимум 20–30 гряд. При проведении измерительных работ необходимо руководствоваться стандартными рекомендациями, которые содержатся в РД 52.08.163–88.

Определение расхода донных наносов по разработанному способу можно разделить на несколько этапов. На первом этапе после первичной технической обработки данных замеров руслового рельефа и получения графика продольного профиля производится исключение малых выступов. Для упрощения процесса обработки рельефа дна вводится понятие *выступов на дне*, в которые включаются гряды и малые выступы. Под грядами подразумеваются дискретные русловые образования, в форме которых осуществляется транспорт донных наносов, под малыми выступами — русловые образования, имеющие высоту меньшую, чем гряды.

Для определения границы возможных размеров гряд и малых выступов выделяются и измеряются высоты всех выступов на дне, включая гряды. Затем строится гистограмма распределения выступов по диапазонам их высот (рис. 2). На гистограмме отделяется область малых выступов от области гряд, характерной наличием максимума в первом диапазоне высот, тогда как для области гряд характерно более равномерное распределение количества выступов по диапазонам высот. Область малых выступов начинается с нуля и заканчивается перед диапазоном высот, где количество выступов наиболее близко к количеству выступов в следующих диапазонах высот, т. е. к началу зоны равномерного распределения. Пример выделения областей выступов приведен на рис. 2.

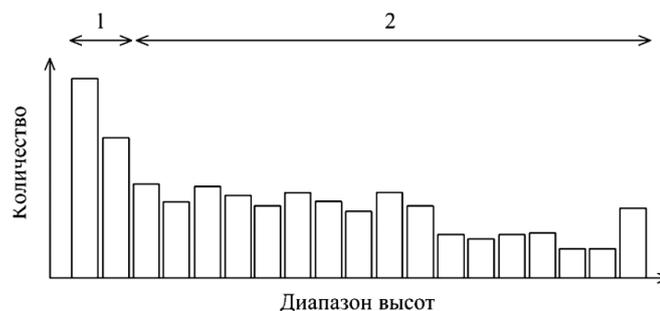


Рис. 2. Пример распределения количества выступов дна по диапазонам высот: 1 — область малых выступов; 2 — область гряд

Далее производится повторное выделение гряд с применением коэффициента фильтрации, позволяющего исключить все выступы, имеющие высоту, меньшую высоты гряд. Коэффициент

фильтрации принимается равным максимально возможной высоте малых выступов. Подвалы выделенных гряд последовательно соединяются. Получившаяся линия называется *линией подвалов*.

На втором этапе измеряется площадь слоя подвижного материала, ограниченная сверху поверхностью гряд, а снизу линией подвалов. Средняя мощность слоя подвижного материала находится путем деления площади слоя подвижного материала на длину линии подвалов:

$$h_{\text{под.мат}} = S_{\text{под.мат}} / L_{\text{лин. под}} \quad (4)$$

где  $h_{\text{под.мат}}$  — средняя мощность слоя подвижного материала;

$S_{\text{под.мат}}$  — площадь подвижного материала;

$L_{\text{лин. под}}$  — длина линии подвалов.

На третьем этапе измеряется скорость движения гряд. В зависимости от качества и количества исходных данных определение скорости гряд может выполняться различными способами. При наличии двух и более последовательно снятых с временным интервалом продольных профилей дна рекомендуется применять ранее известные способы измерения скорости гряд:

1. Измерение скорости смещения гряд на основе ручного измерения на продольном профиле фактического расстояния сдвига гряд за временной интервал с последующим осреднением измеренных скоростей отдельных гряд (аналогично методу, применяемому в ГГИ [5]).

2. Измерение сдвига гряд по характеристикам пространственно-временной корреляции высотных отметок последовательно снятых продольных профилей (аналогично методу А. А. Костюченко [11]). Для этого массив данных промеров представляют в виде табличной функции с равной дискретностью по продольной координате. Затем выполняют расчет значений корреляционной функции для табличных функций двух последовательных промеров по одному и тому же створу. Значение сдвига, соответствующее первому максимуму корреляционной функции, равно среднему смещению донных форм по профилю за период между измерениями. Описание метода приведено в работе [6], на практике он применялся в работах [1], [15], где хорошо себя зарекомендовал. В условиях отсутствия последовательно снятых продольных профилей дна допустимо применение расчетных методов получения скорости движения гряд.

*Методика проведения экспериментов.* Для подтверждения эффективности предлагаемого способа изменения расхода донных наносов в Руслевой гидравлической лаборатории ГГИ была проведена серия экспериментов по методике, разработанной и многократно апробированной в отделе русловых процессов ГГИ [16]. Важнейшим условием проведения экспериментов является соблюдение динамического равновесия. Согласно методике проведения экспериментов, скоростное поле потока и характеристики русловых форм фиксируются после того, как система «поток — деформируемое дно» достигнет динамически равновесного состояния. Критерием такого состояния является неизменность уклона водной поверхности, равенство расходов наносов, подаваемых в поток, и наносов в конце лотка, а также неизменность размеров русловых форм во времени [16].

Экспериментальные исследования проводились в абстрагированных условиях без моделирования каких-либо конкретных водных объектов. Однако исходя из поставленных задач, режим течения в лотке должен соответствовать режиму течения, наблюдаемому в руслах судоходных равнинных рек. Согласно методике ГГИ, определяющим критерием состояния потока является число Фруда, представляющее собой соотношение кинетических сил в потоке и потенциальных сил. Согласно гидравлической классификации рек, предложенной О. А. Петровской [7], равнинные реки можно разделить на две категории:

- крупные равнинные реки —  $Fr < 0,2$ ;
- малые равнинные реки —  $0,2 \leq Fr \leq 0,5$ .

Экспериментальные исследования проводились гидравлических режимах, условия которых представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, критерий состояния потока (число Фруда) во всех экспериментах находился в диапазоне 0,30–0,46. Такое значение соответствует условиям на малых равнинных реках.

Таблица 1

**Условия экспериментов в 100- и 8-метровом гидравлических лотках**

Место эксперимента	Номер эксперимента	$Q$ , л/с	$H_{пот}$ , см	$V_{ср}$ , см/с	Fr	$t$ , мин *
100-метровый лоток	1	35,0	10,0	34,8	0,35	584
	2	55,0	15,0	36,7	0,30	655
	3	45,0	12,5	36,3	0,33	630
8-метровый лоток	4	2,9	4,5	28,2	0,42	312
	5	3,5	5,5	22,9	0,31	217
	6	4,4	5,7	33,2	0,44	170
	7	6,0	6,6	36,7	0,46	143
	8	5,7	8,0	29,0	0,33	83
	9	3,3	6,0	26,4	0,34	520

\*Время эксперимента без учета времени формирования донного рельефа.

В качестве донного материала был использован песок, гранулометрический состав которого приведен в табл. 2. При заданных гидравлических условиях эксперимента обеспечивалось движение всех фракций донных наносов.

Таблица 2

**Гранулометрический состав донных наносов**

Место эксперимента	$d_{10\%}$ , мм	$d_{50\%}$ , мм	$d_{90\%}$ , мм	$d_{90\%} / d_{10\%}$
100-метровый лоток	0,15	0,29	0,68	4,53
8-метровый лоток	0,12	0,15	0,25	2,08

На подготовительном этапе эксперимента в гидравлический лоток с ровным песчаным дном подается необходимый расход воды. Во время этого этапа песчаное дно лотка трансформируется и формируются гряды. Одновременно определяется положение задвижки в нижней части лотка, необходимое для обеспечения условий динамического равновесия потока и песчаного дна. По окончании подготовительного этапа и достижения условия динамического равновесия по всей длине рабочего участка лотка образовались трехмерные гряды (рис. 2).

Для измерения грядового дна и скорости потока были использованы измерители Vectrino, основанные на использовании доплеровского способа измерения скорости и расстояния. Данные инструменты хорошо подходят для использования в лабораторных условиях, а также имеют высокую точность [17].

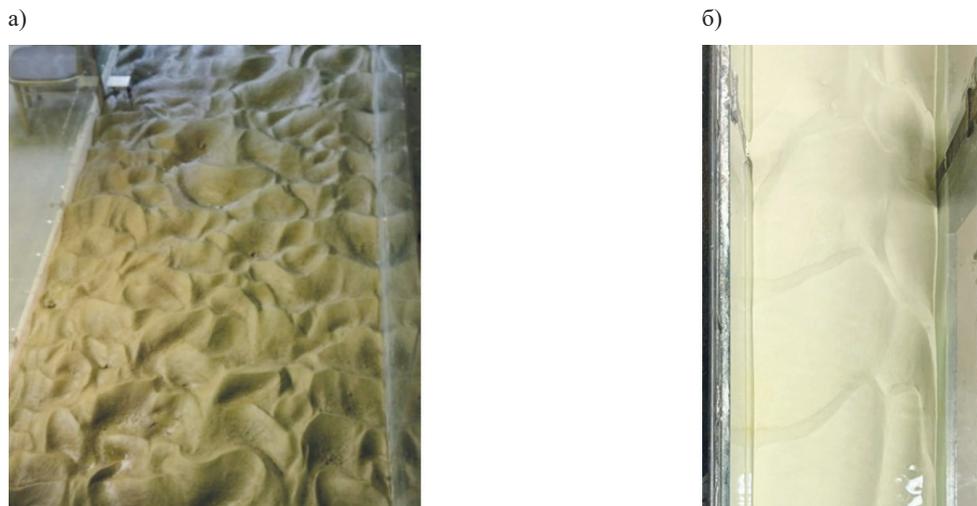


Рис. 3. Сформировавшийся грядовый рельеф дна:  
а — эксперимент 1; б — эксперимент 2

В 100-метровом лотке измерения рельефа проводились по девяти продольным створам, расположенным по ширине лотка на расстоянии 10 см друг от друга, длина каждого створа составила 6 м. Каждый створ измерялся 4 раза с временным интервалом в эксперименте № 1 — 15 мин, в экспериментах № 2 и 3 — 27 мин. В экспериментах № 4–9 измерялись три продольных профиля, расположенные на равном расстоянии по ширине лотка, интервалы составляли 30 мин. Одновременно выполнялась фото- и видеосъемка механизма движения донных наносов по поверхности грядового дна (рис. 3).

Для получения фактического расхода донных наносов после окончания экспериментов измерялось количество песка, вынесенного за пределы рабочего участка. Получение картины распределения расхода наносов по ширине 100-метрового лотка достигалось путем деления выноса песка на 10 участков (струй), по 10 см каждая по ширине лотка. Далее объем выноса делился на длительность эксперимента. Таким образом, объемным методом измерялся эталонный (фактический) расход донных наносов. Полный расход наносов был получен путем суммирования расходов всех струй. В случае экспериментов в 8-метровом лотке вынос песка измерялся сразу по всей ширине лотка.

### Результаты (Results)

На рис. 3 приведен грядовый рельеф дна, наблюдавшийся в условиях первого эксперимента. На выполненных фотографиях дна видно, что структура полученного руслового рельефа весьма хаотична. В большинстве случаев гряды имеют криволинейную плановую форму. Часто встречаются гряды, гребни которых наползают друг на друга, что приводит к формированию гряд с несколькими гребнями.

Наблюдения за движением наносов во время экспериментов показывают, что частицы песка под действием потока воды движутся по напорному склону гряды, где формируется транзитный слой наносов. В таком слое песка частицы перемещаются, перекатываясь до гребня гряды, где наиболее мелкие частицы продолжают движение сальтацией и переносятся потоком на напорный склон нижерасположенной гряды, а крупные частицы сваливаются в подвалье. Такой характер движения донных наносов наблюдался во всех экспериментах.

Наиболее длительные эксперименты проводились с перерывами. После каждой остановки подачи воды проводились измерение выноса песка. Итоговая величина расхода была получена путем осреднения результатов измерений нескольких этапов эксперимента. Измерения проводилось без высушивания и взвешивания. Таким образом, они отражают расход наносов в рыхлом теле. Результаты измерений расхода донных наносов объемным способом приведены в табл. 3 для экспериментов № 1–3 и в табл. 4 для экспериментов № 4–9.

Таблица 3

Расход донных наносов, полученный объемным методом в экспериментах № 1–3

В, см	Номер продольника	Номер эксперимента					
		1		2		3	
		$Q = 35 \text{ л/с}, h = 10 \text{ см}$		$Q = 55 \text{ л/с}, h = 15 \text{ см}$		$Q = 45 \text{ л/с}, h = 12,5 \text{ см}$	
		$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{г}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
0	–	1,82	30,51	3,17	28,71	4,26	48,59
10	1	2,40		3,09		4,48	
20	2	2,86		3,24		4,59	
30	3	3,72		3,25		5,04	
40	4	4,02		3,35		5,15	
50	5	4,02		3,36		5,37	
60	6	3,66		3,40		5,19	
70	7	3,25		3,27		5,04	
80	8	2,72		3,22		4,85	
90	9	2,04		3,20		4,63	
100	–	2,04		3,20		4,63	

**Расход донных наносов, полученный объемным методом в экспериментах № 4–9**

Номер эксперимента	Условия экспериментов	$Q_{\text{эталон}}$ , см <sup>3</sup> / мин
4	$Q = 2,9$ л/с, $H = 4,5$ см	3,05
5	$Q = 3,5$ л/с, $H = 5,5$ см	2,16
6	$Q = 4,5$ л/с, $H = 5,7$ см	3,64
7	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	6,92
8	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	2,06
9	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	0,75

Приведенные результаты измерения расхода донных наносов по фактическому выносу песка являются эталоном. Далее в работе для определения точности результатов измерений с использованием разработанного метода будет выполнено сравнение с результатами измерений по эталонному методу.

*Измерение расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала.* Вначале исходный ряд данных подвергается обработке с целью выделения подвалей гряд. Для этого выделяются и измеряются высоты всех выступов на дне. По полученным данным строится гистограмма распределения выступов по диапазонам их высот (рис. 4). На приведенной гистограмме видно, что первый максимум количества выступов находится в диапазоне высот 0–0,2 см. В диапазоне 0,2–0,4 см количество выступов меньше, чем в предыдущем, но при этом оно не соответствует среднему количеству выступов в следующих диапазонах. Начиная от 0,4 см и заканчивая 2,4 см наблюдается наиболее равномерное распределение. В диапазонах 2,4–3,6 см наблюдается еще одна характерная область высот, в которой количество выступов в половину меньше, чем в предыдущей области. Далее в диапазонах, следующих за 3,6 см, количество выступов постепенно уменьшается.



Рис. 4. Распределения выступов по диапазонам высот (эксперимент № 2)

Анализируя представленные данные, можно заметить, что выступы в диапазоне 0–0,40 см имеют нехарактерное для следующих диапазонов распределение. Такое количество выступов в соответствующих диапазонах является следствием трехмерности гряд. Во время эхолотирования на продольный профиль помимо гряд неизбежно попадает большое количество периферийных (боковых) частей гряд, расположенных в отдалении по ширине от измеряемого профиля. При этом чем меньше высота периферийной части гряды, тем на большее расстояние по ширине она может распространяться и тем самым большее количество таких периферийных частей гряд будет попадать в минимальные диапазоны высот.

Кроме того, практика измерений показывает, что чем больше точность измерений (количество отметок на единицу длины), тем большее количество выступов оказывается в наименьших

диапазонах. Учет этих выступов при расчете средней высоты гряд приводит к неоправданному занижению искомой средней высоты гряд. Исходя из этого для получения корректной величины средней высоты гряды необходимо выделять гряды с использованием фильтрации. В ходе выделения гряд на продольниках в эксперименте № 2 выполнялось повторное выделение гряд с исключением малых выступов, имеющих высоту менее 0,4 см.

В экспериментах № 1 и 3 также было выполнено исключение выступов с высотами в среднем менее 0,3–0,4 см, в экспериментах № 4–9 выполнена фильтрация выступов в среднем менее 0,2–0,3 см. Далее проводилась линия, соединяющая подвалы гряд. С полученного графика снималась площадь слоя подвижного материала, ограниченная сверху линией поверхности гряд, снизу — линией подвалов гряд (рис. 5). Средняя мощность слоя подвижного материала вычислялась для каждого продольного створа.

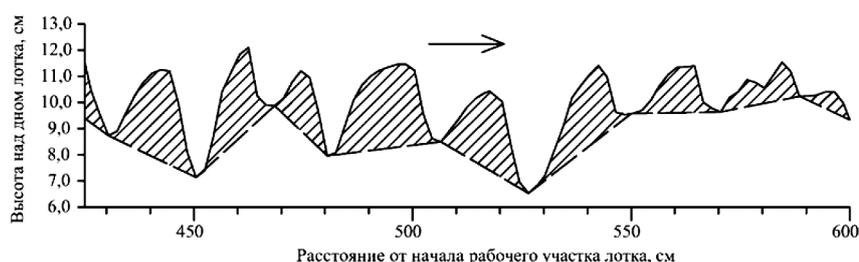


Рис. 5. Выделение границ активного слоя на эхограмме (эксперимент № 2):

▨ — слой подвижного материала; — — — линия подвалов гряд; — — — линия поверхности гряд

Измерение скорости смещения гряд выполняется методом кросс-корреляции. Пример расчета коэффициентов двух последовательно измеренных продольных профилей дан в табл. 6 с равной дискретностью по продольной координате.

Таблица 6

**Расчет коэффициента корреляции для последовательных промеров по центральному продольнику (эксперимент № 9)**

Расстояние от начала рабочего участка, см	Отметки дна по центральному продольнику, $t = 0$	Отметки дна по центральному продольнику, $t = 30$ мин	Сдвиг между ячейками при расчете коэффициента корреляции	Коэффициент корреляции
4,0	4,47	4,61	0	0,7491
4,5	4,36	4,68	1	0,8295
5,0	4,06	4,79	2	0,8897
5,5	3,62	4,78	3	<b>0,9222</b>
6,0	3,56	4,60	4	0,9218
6,5	3,07	4,26	5	0,8863
...	...	...	...	...

Далее выполняется расчет значений коэффициента корреляции двух промеров с различными значениями сдвига ячеек между ними. Сдвиг, имеющий наибольшее значение коэффициента корреляции, является истинным сдвигом второго измерения относительно первого за период между измерениями. Скорость перемещения продольного профиля (средняя скорость гряд) находится путем деления расстояния, соответствующего найденному сдвигу, на временной интервал между измерениями. Аналогичные расчеты выполняются для всех измеренных продольных профилей.

Расчет элементарного расхода донных наносов выполняется по формуле (5). Эталонный расход измерялся в рыхлом теле, поэтому измерение по данной формуле выполняется также в рыхлом теле:

$$q_{\text{эле}} = h_{\text{под.мат}} C_{\text{г}}. \quad (5)$$

Полный расход донных наносов определяется путем интегрирования элементарных расходов по ширине лотка. Для этого, согласно номеру продольного створа, элементарный расход для экспериментов № 1–3 заносится в графы 3, 6 и 9 табл. 7. Расчет расхода производится для каждой струи отдельно (графы 4, 7 и 10 табл. 7). Для этого находится среднее между двумя значениями элементарных расходов для струи, затем полученное значение умножается на ширину струи. Полный расход рассчитывается как сумма расходов всех десяти струй (графы 5, 8 и 11 табл. 7).

Расход донных наносов для экспериментов № 4–9 (табл. 8) рассчитывается сразу для всей ширины лотка без разбивки по струям — средняя мощность слоя подвижного материала, полученная для каждого эксперимента (графа 3), умножается на соответствующую скорость гряд (графу 4) и на ширину лотка (графа 5). Полученное значение полного расхода донных наносов заносится в графу 6.

Таблица 7

**Расход донных наносов, полученный по параметру средней мощности слоя подвижного материала в экспериментах № 1–3**

В, см	Номер продольника	Номер эксперимента								
		1			2			3		
		$Q = 35 \text{ л/с}, h = 10 \text{ см}$			$Q = 55 \text{ л/с}, h = 15 \text{ см}$			$Q = 45 \text{ л/с}, h = 12,5 \text{ см}$		
	$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{струя}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{струя}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$q_{\text{элемент}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	$Q_{\text{струя}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	
0		0,000	1,401	33,10	0,000	1,177	27,43	0,000	1,600	32,691
10	1	0,280	2,849		0,235	2,493		0,320	3,104	
20	2	0,290	2,987		0,263	2,882		0,301	2,908	
30	3	0,308	3,684		0,313	3,266		0,281	2,993	
40	4	0,429	4,325		0,340	3,237		0,318	3,468	
50	5	0,436	4,354		0,307	3,276		0,376	3,859	
60	6	0,435	4,213		0,348	3,703		0,396	4,242	
70	7	0,408	4,113		0,393	3,421		0,452	4,146	
80	8	0,415	3,624		0,292	2,715		0,377	4,128	
90	9	0,310	1,550		0,251	1,257		0,449	2,244	
100	–	–		0,000		0,000				

Таблица 8

**Расход донных наносов, полученный по параметру средней мощности слоя подвижного материала в экспериментах № 4–9**

Номер эксперимента	Условия эксперимента	Характеристики			$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
		$h_{\text{под.мат}}, \text{ см}$	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	$B, \text{ см}$	
4	$Q = 2,9 \text{ л/с}, H = 4,5 \text{ см}$	0,95	0,15	21,0	3,00
5	$Q = 3,5 \text{ л/с}, H = 5,5 \text{ см}$	1,09	0,11		2,52
6	$Q = 4,5 \text{ л/с}, H = 5,7 \text{ см}$	0,90	0,18		3,42
7	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	0,94	0,33		6,51
8	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	1,08	0,08		1,81
9	$Q = 6,0 \text{ л/с}, H = 6,6 \text{ см}$	0,80	0,05		0,84

Для анализа результатов измерений расхода донных наносов, выполненных по разработанному методу далее в процессе исследования, было выполнено сравнение с результатами измерений по эталонному методу.

### Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты измерения полного расхода наносов заносятся в сравнительную табл. 9. Результаты измерений предлагаемым методом сравниваются с результатами эталонных измерений. В табл. 9 приняты следующие условные обозначения:  $Q_{\text{полн. расч}}$  — результаты измерений расхода по разработанному методу,  $Q_{\text{полн. эталон}}$  — результаты эталонных измерений. Для вычисления относительного отклонения была использована формула (6). Среднее относительное отклонение рассчитывалось как среднеарифметическое между значениями относительных отклонений:

$$\Delta = \frac{|Q_{\text{полн. расч}} - Q_{\text{полн. эталон}}|}{Q_{\text{полн. эталон}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемый метод измерения имеет точность, в среднем равную 11,12 %. В отдельных случаях, например, в экспериментах № 3 и 5, ошибка достигает 32,72 % и 16,67 %. Причиной ее может быть, например, недостаточная фильтрация малых выступов.

Таблица 9

**Отклонение (ошибка) расхода наносов, полученного косвенными методами, от расхода наносов, полученного прямым объемным методом**

Место эксперимента	Номер эксперимента	Условия эксперимента	$Q_{\text{полн. расч.}}$ см <sup>3</sup> /мин	$Q_{\text{полн. эталон.}}$ см <sup>3</sup> /мин	Отклонение абсолютное	Отклонение относительное, %
100-й лоток	1	$Q = 35,0$ л/с, $H = 10,0$ см	33,10	30,51	2,59	8,49
	2	$Q = 55,0$ л/с, $H = 15,0$ см	27,43	28,71	1,28	4,46
	3	$Q = 45,0$ л/с, $H = 12,5$ см	32,69	48,59	15,9	32,72
8-й лоток	4	$Q = 2,9$ л/с, $H = 4,5$ см	3,00	3,05	0,05	1,64
	5	$Q = 3,5$ л/с, $H = 5,5$ см	2,52	2,16	-0,36	16,67
	6	$Q = 4,5$ л/с, $H = 5,7$ см	3,42	3,64	0,22	6,04
	7	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	6,51	6,92	0,41	5,92
	8	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	1,81	2,06	0,25	12,14
	9	$Q = 6,0$ л/с, $H = 6,6$ см	0,84	0,75	-0,09	12,00
—	—	—	Среднее относительное отклонение			11,12

Кроме того, к ошибкам может приводить сам способ измерения параметров донного рельефа. В работе [1], где проводилась экспериментальная проверка различных методов измерения расхода донных наносов, отмечается, что трехмерные гряды в каждой точке поперечного профиля имеют разную высоту, и из-за хаотичности их расположения продольный створ пересекает такие гряды в различных точках их поперечного профиля. Таким образом, при осреднении высоты гряд по продольному профилю получится не истинная средняя высота гряд, а ее заниженное значение. В работе [1] при проверки различных методов определения расхода донных был использован поправочный коэффициент, равный 1,35. Таким образом, при определении расхода измеренная высота гряд умножалась на коэффициент 1,35. В итоге использование этого коэффициента позволило повысить точность получаемых данных расхода.

В настоящей работе измерения выполняются по параметру слоя подвижного материала. Этот параметр, по своей сути, также является характеристикой гряд. Попытка использовать данный коэффициент 1,35 для увеличения величины средней мощности слоя подвижного материала

приведет к увеличению получаемого расхода донных наносов. В результате этого средняя относительная ошибка возрастет и достигнет 33,17 %. Таким образом, вопрос применения поправочного коэффициента в предлагаемом методе, а также его величины требуют отдельного исследования.

Сравнивая полученные результаты с результатами экспериментальной проверки других методов, выполненной в работе [1], следует отметить, что предлагаемый метод имеет среднее отклонение, соизмеримое с методом А. А. Костюченко (22,25 % без поправочного коэффициента и 5,25 % с коэффициентом). При этом результаты измерений методами ISSDOT и ГГИ отклонения составили, соответственно, 40,57 и 53,16 %, что значительно превышает отклонение, полученное в предлагаемом методе. Однако исследование, выполненное в работе [1], включало лишь два эксперимента. Для формулирования полноценных рекомендаций для применения того или иного метода необходимо выполнение более обширных исследований как в экспериментальных, так и в натуральных условиях.

### Заключение (Conclusion)

В данной работе выполнен анализ существующих методик измерения расхода донных наносов. Установлено, что современные методы измерения имеют ряд существенных недостатков. В частности, классический метод ГГИ, часто используемый в современной практике, имеет ряд ограничений, не позволяющих выполнить оценку расхода донных наносов с высокой точностью. Широко известный в англоязычной литературе метод ISSDOT также имеет недостатки. В ходе экспериментальной проверки было выявлено, что результаты измерений, полученные с использованием данных методов, имеют значительные ошибки [1].

Отмечается, что наиболее современный отечественный метод, разработанный А. А. Костюченко, имеет существенное преимущество по сравнению с классическим методом ГГИ. Данное преимущество заключается в использовании параметров всех гряд, выделенных на продольниках, для оценки расхода наносов. Способ выделения гряд подразумевает фильтрацию выступов дна с использованием величины среднеквадратического отклонения отметок дна. Однако эта величина по своей природе не может отражать реальных возможных размеров гряд, формирующихся на участке реки под воздействием потока. Для корректного выделения гряд необходимо использовать иной показатель минимально возможной высоты гряд. Анализ некоторых других современных методов измерений показал, что они также имеют различные недостатки. Серьезным ограничением большинства указанных методов является невозможность определения расхода донных наносов при дефицитных грядах.

В настоящей работе предложен новый метод измерения расхода донных наносов, основанный на применении параметра средней мощности слоя подвижного материала. Согласно этому подходу, для определения расхода донных наносов используются площадные характеристики гряд, благодаря чему учитываются все гряды, выделенные на продольнике после проведения фильтрации выступов дна, позволяющей отделить малые выступы дна от гряд на профиле. В ходе фильтрации исключаются все малые выступы дна. Такой подход к оценке высоты перемещающейся области руслового рельефа позволяет повысить точность оценки расхода донных наносов. Также благодаря использованию площадных характеристик гряд появляется возможность определения расхода донных наносов по параметрам грядового рельефа, состоящего из дефицитных гряд.

Для проверки предлагаемого метода была проведена серия экспериментов в гидравлических лотках. Рельеф дна состоял из трехмерных гряд, гидравлические условия потока были приближены к условиям равнинных судоходных рек. Анализ результатов экспериментов показал, что предлагаемый способ измерения расход донных наносов имеет среднюю ошибку, равную 11,12 %. При сравнительном анализе точности можно заметить, что ошибка в результатах, полученная при применении методов ГГИ и ISSDOT в работе [1], превышает ошибку, полученную при применении предлагаемого метода.

Дальнейшие исследования и усовершенствования разработанного метода должны быть основаны на большем количестве экспериментальных и натуральных данных. Кроме того, необходимо проведение детальных исследований транспорта донных наносов при рельефе, состоящем из дефицитных гряд.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Заварзин Р. В. Измерения расхода донных наносов, перемещающихся в грядовой форме: экспериментальное исследование косвенных методов измерений / Р. В. Заварзин, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. // Междунар. науч.-практ. конф., СПб., 29–31 мая 2023 года. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 213–231. — EDN NXYSCKN.
2. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 311 с.
3. Engel P. Computation of bed load using bathymetric data / P. Engel, Y. Lam Lau // J. Hydraul. Div. — 1980. — Pp. 369–380.
4. Сидорчук А. Ю. Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд / А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42 — № 1. — С. 38–51. — DOI: 10.7868/S0321059615010137. — EDN TCJSEN.
5. Алексеевский Н. И. Морфология и динамика активных гряд в русле реки Терек / Н. И. Алексеевский, А. Ю. Сидорчук // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 147–157. DOI: 10.7868/S0321059617010035. — EDN YIVSNF.
6. Костюченко А. А. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд / А. А. Костюченко, Р. В. Заварзин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. // Междунар. науч.-практ. конф., СПб., 29–31 мая 2023 года. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 151–164. — EDN DTKWVK.
7. Петровская О. А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.27 / Ольга Андреевна Петровская. — М., 2019. — 252 с. — EDN ZLANZR.
8. Gaeuman D. Field assessment of alternative bed-load transport estimators / D. Gaeuman, R. B. Jacobson // Journal of Hydraulic Engineering. — 2007. — Vol. 133. — Pp. 1319–1328. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1319).
9. Abraham D. Bed-load measurements on large, sand-bed rivers in the United States. / D. Abraham, T. McAlpin, K. Jones // E3S Web Conf. — Vol. 40. — 2018 — Pp. 8. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184006021.
10. Pat. 11067475B2 United States IPC G01M 10/00 Bedload transport methodology and method of use / Tate O. McAlpin, D. Abraham, J. Shelley, Thad C. Pratt, inventor // Individual assignee; заявл. 01.04.2013; опубл. 20.07.2021.
11. Wilbers A. The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. / Wilbers, A. // Netherlands Geographical Studies 323, The Royal Dutch Geographical Society, Utrecht, Netherlands. — 2004. — 227 p.
12. Nittrouer J. A. Bedform transport rates for the lowermost Mississippi River / J. A. Nittrouer, M. A. Allison, R. Campanella // Journal of Geophysical Research. — 2008. — Vol. 113. — Pp. 1–16. DOI: 10.1029/2007JF000795.
13. Месерлянс Г. Г. Деформации русла Р. Невы / Г. Г. Месерлянс, Н. М. Башкова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — Т. 2. — С. 117–128. — EDN MQGEIX.
14. Заявка на пат. Российская Федерация, МПК G01F 22/00 Способ определения расхода донных наносов по параметру средней мощности слоя подвижного материала / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков; заяв. и патентообл. Государственный гидрологический институт. — № 2024117807/20; заявл. 26.06.2024.
15. Гладков Г. Л. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская, Р. В. Заварзин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196. — EDN BVBGHO.
16. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани — СПб.: ООО «Нестор-История», 2011. — 504 с. — EDN QKKGJD.
17. Liu D. The assessment of an Acoustic Doppler Velocimetry profiler from a user's perspective / D. Liu, K. Alobaidi, M. Valyrakis // Acta Geophysica. — 2022. — Т. 70. — № 5. — С. 2297–2310.

**REFERENCES**

1. Zavarzin, R. V., and O. A. Petrovskaya. “Measurements of bed load transport taking place in the form of dunes: an experimental study of indirect measurement methods.” *Vodnye puti i ruslovye protsessy*.

*Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 213–231.

2. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
3. Engel, P. and Y. Lam Lau “Computation of bed load using bathymetric data.” *J. Hydraul. Div.* (1980): 369–380.
4. Sidorchuk, A. Y. “Evaluating bedload transport rate in a river bed taking into account data on the active and passive bed-forms dynamics”. *Water Resour* 42 (2015): 38–51. DOI: 10.1134/S009780781501011X.
5. Alekseevskii, N. I., Sidorchuk, A. Y. “Morphology and dynamics of active bed forms in the Terek R. Channel.” *Water Resour* 44 (2017): 226–236. DOI: 10.1134/S0097807817010031.
6. Kostyuchenko, A. A. and R. V. Zavarzin “Metod vypolneniya i obrabotki izmerenij dlya opredeleniya parametrov donnykh gryad.” *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putej: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023.
7. Petrovskaya Olga Andreevna Optimizatsiya metodov rascheta raskhoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskih parametrov rek. PhD diss. M.: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vodnykh problem Rossijskoj akademii nauk, 2019.
8. Gaeuman, D. and R. B. Jacobson “Field assessment of alternative bed-load transport estimators”. *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (2007): 1319–1328. DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9429(2007)133:12(1319).
9. Abraham, D., T. McAlpin and K. Jones “Bed-load measurements on large, sand-bed rivers in the United States” *E3S Web Conf. Volume* 40 (2018): 8 p. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184006021.
10. Tate O. McAlpin, D. Abraham, J. Shelley and Thad C. US 11 067 475 B2, IPC G 01 M 10/00. Bedload transport methodology and method of use. United States, Publ. 01 Apr 2013.
11. Wilbers, A. *The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes*. Netherlands Geographical Studies 323, The Royal Dutch Geographical Society, Utrecht, Netherlands (2004): 227.
12. Nittrouer, J. A., Allison M. A. and Campanella R. Bedform transport rates for the lowermost Mississippi River *Journal of Geophysical Research* 113 (2008):1–16 p. DOI: 10.1029/2007JF000795.
13. Meserlyans, G. G., and Bashkova N. M. “Deformatsii rusla R. Nevy” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 2(6) (2010): 117–128.
14. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov Patent application, 2024 117 807/20 IPC G 01 F 22/00 Sposob opredeleniya raskhoda donnykh nanosov po parametru sredney moshchnosti sloya podvizhnogo materiala. Russian Federation. Declared 26 July 2024.
15. Gladkov, Gennadii L., Polina S. Rzhakovskaya, and Ruslan V. Zavarzin. “Experimental studies of flow hydraulics and bedload transport parameters in unsteady flow.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.
16. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Ekspperimental’nye issledovaniya i gidravlicheskoje modelirovanie rechnykh potokov i ruslovykh protsessov*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.
17. Liu, D., Alobaidi, K. & Valyrakis, M. “The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user’s perspective.” *Acta Geophys* 70 (2022): 2297–2310. DOI: 10.1007/s11600-022-00896-3.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Заварзин Руслан Витальевич** —  
младший научный сотрудник  
ФГБУ «Государственный гидрологический институт»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23  
e-mail: zavarzr@gmail.com

**Католиков Виктор Михайлович** —  
кандидат технических наук, профессор  
ФГБУ «Государственный гидрологический институт»  
198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, 2я линия В. О., 23  
e-mail: v.katolikov@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zavarzin, Ruslan V.** —  
junior researcher  
State Hydrological Institute  
23 2nd line of Vasilyevsky Island,  
St. Petersburg, 199004,  
Russian Federation  
e-mail: zavarzr@gmail.com

**Katolikov, Viktor M.** —  
PhD, professor  
State Hydrological Institute  
23 2nd line of Vasilyevsky Island,  
St. Petersburg, 199004,  
Russian Federation  
e-mail: v.katolikov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 октября 2024 г.

Received: Oct. 16, 2024