

УДК 556.537

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ В РЕКАХ С МЕЛКИМ АЛЛЮВИЕМ

© 2024 г. О. А. Петровская*

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, 199053 Россия

**e-mail: riverchannel@yandex.ru*

Поступила в редакцию 12.10.2023 г.

После доработки 16.01.2024 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

Выполнен обзор современных методов измерения расхода донных наносов в реках с мелким аллювием. Выделены четыре группы методов: измерение батометрами, повторное продольное эхолотирование однолучевым эхолотом, повторное продольное эхолотирование многолучевым эхолотом и измерение при помощи акустических Допплеровских профилографов течений. Рассмотрены сильные и слабые стороны каждого метода. В связи с тем, что транспорт донных наносов происходит в грядовой форме, наиболее перспективными представляются методы, основанные на использовании эхолотов, так как они позволяют непосредственно учесть целостность грядовых образований.

Ключевые слова: измерение расхода донных наносов, донные батометры, однолучевой эхолот, многолучевой эхолот, АДПТ, донная гряда.

DOI: 10.31857/S0321059624040077 **EDN:** APLEJR

ВВЕДЕНИЕ

В реках с мелким, песчано-гравийным составом руслового материала (иначе в равнинных реках) ввиду большой разницы между глубиной потока и размером частиц и достаточных значений скоростей течения донные наносы большую часть года перемещаются в форме гряддюн. Таким образом, движение наносов носит дискретный характер, когда они перемещаются более-менее замкнутыми группами, где преимущественно частица проходит путь по напорному склону гряды к гребню, откуда сваливается в подвалье, где засыпается следующими за ней частицами и остается на месте до тех пор, пока вновь не окажется на напорном склоне вследствие смещения гряды вниз по течению на расстояние, равное ее длине. Величина “транзитной составляющей” при грядовом движении наносов в установившемся режиме течения не превышает современной точности измерений.

Возможность достоверно измерить расход донных наносов (РДН) важна для решения множества водохозяйственных задач, изучения закономерностей транспорта донных наносов

и установления соответствующих расчетных зависимостей.

В настоящее время, вероятно, ввиду большой погрешности существующих методов измерений и отсутствия консенсуса в научной общественности относительно предпочтительности того или другого метода для тех или иных условий, международные стандарты по измерению РДН до сих пор не созданы. Тем не менее можно говорить о том, что сложилась традиция применения определенных средств и методов измерения для рек с мелким и крупным аллювием [22], при этом арсенал приборов и методов для крупного аллювия значительно богаче. На реках с мелкими наносами, помимо редких измерений объемным методом [16, 33, 40], в настоящее время применяются метод измерения батометрами, методы, основанные на повторном продольном эхолотировании (ППЭЛ) однолучевыми и многолучевыми приборами и метод измерения при помощи акустических Допплеровских профилографов течений (АДПТ).

Ввиду трудоемкости и дороговизны постановки измерений РДН, комплексного полномас-

штабного исследования по испытанию и сравнению всех этих методов до сих пор проведено не было. Тем не менее ежегодно публикуются работы, посвященные применению какого-либо одного метода [1, 3, 13, 18, 26, 46] или сравнению результатов измерений по двум и более методам [15, 19, 21, 24, 28, 29, 34]. Сравнение методов проводится на основе небольшого количества измерений, как правило, выполненных на одном или двух-трех объектах.

Настоящая статья посвящена обзору применяемых сегодня методов измерений. Текст построен таким образом, что большую его часть занимает последовательное описание четырех групп методов и их вариантов: метода измерения батометрами, ППЭЛ однолучевым эхолотом, ППЭЛ многолучевым эхолотом и метода применения АДПТ. Для каждого метода, по возможности объективно, приводятся его сильные и слабые стороны. Дается авторское видение проблемы измерения в реках с мелким аллювием и перспектив дальнейших исследований.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ БАТОМЕТРАМИ

Батометры исторически – первый инструмент для измерения РДН. Одно из первых измерений донным батометром выполнено А.П. Дэвисом в 1898 г. в Никарагуанском канале [11]. С тех пор появились десятки батометров разных типов и модификаций [22, 25].

При использовании донных батометров удельный РДН в твердом теле в объемных единицах q_τ определяется по формуле [27]:

$$q_\tau = (1 - p)\beta \frac{(W_n - W_{\text{ни}})}{bt}, \quad (1)$$

где p – коэффициент пористости грунта, β – калибровочный коэффициент батометра, W_n – средний объем пробы донных наносов, $W_{\text{ни}}$ – объем “нулевой пробы”, b – ширина входного отверстия батометра, t – время отбора пробы донных наносов. “Нулевая проба” получается предварительно путем опускания до дна и немедленного поднятия к поверхности донного батометра.

В настоящее время на реках с мелкими наносами принято использовать батометры, основан-

ные на принципе разности давлений на входе и выходе из металлической ловушки. Первый батометр этого типа был создан В.Н. Гончаровым [11]. За счет большого размера выходного отверстия на выходе из ловушки давление падает [25], что способствует тому, что скорость потока на входе в прибор примерно равна скорости окружающего потока, благодаря чему частицы наносов не должны откладываться перед входным отверстием батометра или обходить его.

Самый популярный из применяемых ныне – батометр Хелли–Смита (Helley–Smith) (ХС) [19, 21, 34–36]. Он создан в 1971 г. на основе более раннего батометра “Арнхем” (“Arnhem”) [24]. Последний имеет размер входного отверстия 8.5×5.0 см² и предназначен для измерения РДН частиц размером 0.3–5 мм [32]. Оригинальный батометр (ХС) предназначен для установки на малые глубины, для удержания вручную и для работы в прозрачной воде [27], поэтому, в отличие от своего предшественника, имеет простейшую конструкцию. Он имеет входное отверстие 7.62×7.62 см², отношение площадей поперечных сечений выходного и входного отверстий 3.22 и предназначен для измерения транспорта наносов размером 2–10 мм [24]. В дальнейшем было разработано много модификаций этого батометра для разных условий (больших и малых рек, мелких и крупных наносов). В 1985 г. Д. Хаббел и др. [24] провели тестирование одной из версий батометра ХС с отношением площадей отверстий 1.4 и показали его высокую эффективность для частиц всех размеров. Этот батометр принят комитетом правительства США по наносам в качестве стандартного для использования федеральными службами. Батометр получил название “USBL-84”, или “BL-84”.

В 1992 г. Л. Ван Рейн и М. Гавиш [27, 44] предложили новый батометр ДНС (Delft Nile Sampler, DNS). Он сконструирован для работы в том числе на больших глубинах в песчаных руслах, потенциально с большим количеством взвешенных наносов, в связи с чем характеризуется весьма сложной конструкцией, частично заимствованной у батометра “Арнхем”. Размер входного отверстия прибора 9.6×5.0 см². В его комплектацию входят батометры для взвешенных наносов, измеритель скорости течения и ви-

деокамера для наблюдения за поступлением наносов в ловушку.

В 1996 г. некоторые конструкционные принципы батометра ДНС были взяты разработчиками специальной модификации батометра ХС для песка Хелли–Смит Сэнд (Helley–Smith Sand) [27]. Его конструкция значительно усложнена по сравнению с исходным батометром ХС и гораздо больше соответствует условиям глубоких равнинных рек. Батометр снабжен измерителем скорости и видеокамерой. По данным [27], этот батометр менее точен, чем ДНС.

Выраженное положительное свойство метода измерения батометрами – возможность получения проб донных наносов, которые можно подвергнуть всестороннему анализу [24]. Тем не менее этот метод обладает существенными и широко известными недостатками. В 1954 г. Г.И. Шамов [10], выполнив обобщение отечественного и зарубежного опыта по созданию и использованию донных батометров, пришел к выводу о несостоятельности данного метода измерений. Им были названы следующие ниже его недостатки.

1. Вносимые в поток батометры всех конструкций кардинально изменяют естественную структуру руслового потока, морфологию русла в местах их установки и режим транспорта наносов.
2. Все батометры имеют те или иные конструктивные недостатки, как правило, не обеспечивающие плотного сопряжения батометра с дном с учетом неровностей его рельефа и наличия на дне рифелей, гряд или крупных галек. В результате этого происходит размыв дна перед входным отверстием прибора, нарушается естественный режим движения наносов и условия их поступления в батометр.
3. В текущей воде при значительных глубинах, скоростях потока $>2-3$ м/с и интенсивном транспорте донных наносов опустить и установить батометр на дно трудно. Имеет место существенный снос прибора по течению.
4. Многолетняя практика применения батометров-ловушек со сплошными стенками показывает, что их использование на реках чрезвычайно затруднительно.
5. При использовании батометров-сеток возникает проблема влияния размера ячеек сетки на показания батометра.
6. Тарировка приборов в отношении количества улавливаемых ими наносов в зависимости от скорости потока, продолжительности выдержки прибора на дне, состава и формы транспорта наносов у дна представляется трудно осуществимой. Даже наиболее конструктивно совершенные батометры требуют многократного повторения измерений. Их применение ограничено конкретными условиями водного и руслового режима рек.
7. Неравномерность поступления крупных наносов в сетчатые батометры по мере их накопления нарушает естественный режим дальнейшего поступления наносов в батометр, приводит к обходу ими батометра и вымыванию более мелких частиц через сетку.

В современной литературе [21, 28] публикуются аналогичные критические тезисы в адрес этого метода. На реках с мелкими наносами в силу их легкости, подвижности и грядового рельефа эти недостатки выражаются наиболее сильно.

ППЭЛ ОДНОЛУЧЕВЫМ ЭХОЛОТОМ

Методы, основанные на измерении характеристик гряд

Впервые этот метод был предложен Ф. Экснером в 1920 г. [2]. РДН здесь рассматривается как функция высоты и скорости перемещения донных гряд и вычисляется по формуле [4, 39]:

$$q_T = (1 - p) \alpha h_T C_T, \quad (2)$$

где $\alpha = \omega_T / (h_T l_T)$ [4] – коэффициент формы (или полноты профиля) гряды (по Экснеру, равен 0.5), h_T – высота гряды, C_T – скорость перемещения гряды, ω_T – площадь продольного сечения гряды, l_T – длина гряды.

Данный метод на практике реализуется по-разному как в плане выбора учитываемых в расчетах гряд, так и в плане подхода к определению их характеристик. Так, для расчета РДН могут избираться лишь гряды-дюны наиболее устойчивого профиля, как это принято в практике Отдела

русловых процессов Государственного гидрологического института [6]. Руководящий документ РД 52.08.163-88 [8] не дает указаний, все ли гряды, зафиксированные на продольном профиле, нужно учитывать, что подводит пользователя к мысли, что должны быть учтены все. Методом Московского государственного университета, выделяющим 5 типов гряд, предлагается рассчитывать РДН как сумму частных расходов активных типов гряд (при этом частный расход для каждого типа гряд определяется по формуле (2)) [9].

Существует большой ряд подходов к определению размеров гряд [41]. Длина гряды может определяться как расстояние между продольными положениями минимальных высотных отметок двух соседних подвалов [6] или двух соседних гребней [8]. Высота гряды может определяться как перпендикуляр от гребня гряды до горизонтальной плоскости, пересекающей отметку нижнего по течению подвала [6, 8], или перпендикуляр от гребня гряды до горизонтальной плоскости, пересекающей отметку верхнего по течению подвала [41]. Реже используется подход, в котором длиной гряды считают расстояние между минимальными отметками соседних подвалов, а высотой гряд — перпендикуляр от гребня гряды к ее длине [28, 41].

Часть исследователей считает необходимым предварять измерение размеров гряд приведением эхограммы к нулевому тренду, который представляет собой среднюю горизонтальную линию дна [41, 42]. В этом случае длина гряды может определяться как расстояние по средней линии дна между двумя соседними лобовыми или тыловыми склонами. П. Энгель и И.Л. Лау [24] в силу сложности и неоднозначности определения высоты гряд вместо формулы (2) предлагают следующую зависимость:

$$q_T = 1.32(1 - p) \bar{\xi} C_r, \quad (3)$$

где $\bar{\xi}$ — среднее значение ξ , ξ — разность по модулю между отметкой дна и его средним уровнем $\bar{\eta}$ ($\xi = \eta - \bar{\eta}$, где η — отметка дна).

Скорость гряды определяется по смещению характерных точек гряды (например, гребня) Δx за время между промерами Δt :

$$C_r = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (4)$$

при этом величина сдвига определяется или как среднее арифметическое смещений всех учтенных гряд [6, 8], или методом кросс-корреляции последовательных эхограмм [24].

Коэффициент формы гряды в отечественной практике обычно принимается 0.5–0.6 [6, 8]. За рубежом используются разные, близкие к этим значения [24, 28]. Хорошо, если α определяется непосредственно по эхограммам конкретного участка.

В работе Д. Гаумана и Р.Б. Якобсона [21] предлагаются три более сложных метода обработки эхограмм. В первом методе характеристики гряд определяются по конкретным грядкам визуально. Для каждой гряды рассчитывается РДН по формуле (2), $\alpha = 0.6$. При этом высота гряды рассчитывается за время первого и второго измерения как разность между отметкой гребня гряды и средним арифметическим отметок верхнего и нижнего подвалов. Итоговая высота гряды определяется как среднее арифметическое за два срока измерений. Скорость гряды определяется как отношение сдвига гряды ко времени между съемками. Величина сдвига гряды определяется как среднее между величинами сдвига ее нижнего подвала, пика и верхнего подвала. РДН определяется как среднее взвешенное из расходов, рассчитанных по формуле (2) для каждой отдельной гряды, где вес гряды принимается равным ее доле в общей длине профиля.

Во втором методе разработан компьютерный алгоритм, определяющий границу подвижного дна путем соединения подвалов гряд на каждом профиле прямыми линиями. Далее алгоритм интегрирует площадь каждой гряды над соответствующей частью границы подвижного слоя, и путем деления площади гряды на ее длину получается средняя высота гряды (в этом случае коэффициент формы гряды в формулу (2) вводить не нужно). Итоговая высота гряды вычисляется как среднее арифметическое между определенными за каждый срок измерений. Как побочный продукт интегрирования площади гряды можно рассчитать коэффициент формы и продольное положение центра массы гряды. Последний па-

раметр используется для нахождения среднего продольного положения гряды. Оно определяется как среднее арифметическое между продольным положением центра массы гряды и средним арифметическим между продольными положениями верхнего и нижнего подвалов. Величина смещения гряды по течению рассчитывается нахождением разности между продольными положениями гряды в каждый срок измерений, и итоговый РДН определяется как среднее взвешенное расхождений отдельных гряд.

В настоящее время используются полуавтоматические или автоматические алгоритмы и программы, анализирующие данные эхолотирования, которые на выходе выдают размеры гряд, например: БТТ (ВТТ, Bedform Tracking Tool) К.Ф. Ван дер Марк и А. Блом [41, 42], алгоритм И. Кавальери и Л. Чиппа [17, 37] и Бедфомз-АТМ (Bedforms-АТМ) Р.Р. Гуттиереза и др. [23]. Бедфомз-АТМ также комплексно описывает иерархическую структуру грядового рельефа.

Метод определения РДН по характеристикам гряд признается и в отечественной, и в зарубежной [24, 29] литературе достаточно надежным. Выраженный его недостаток – затруднительность применения на малых реках ввиду нестационарности в них речного стока и сравнительной инерционности гряд. В таких случаях РДН – интегральное выражение изменений гидравлических характеристик потока и не может быть поставлен в соответствие каким-либо их дискретным значениям, что значительно снижает точность измерений [24]. Другой серьезный его недостаток – субъективизм как при выделении отдельных гряд, так и при определении их характеристик. Возможно, в дальнейшем при увеличении знаний о грядовом движении наносов и повышении их качества этот недостаток будет постепенно ликвидироваться.

Метод Д. Гаумана и Р.Б. Якобсона, не требующий измерения характеристик гряд

Этот метод [21] разработан, чтобы избежать необходимости работы с отдельными грядами и их характеристиками. Основное преимущество метода заключается в том, что он может быть применен к участкам дна, где часть гряд не может

быть четко идентифицирована. На совмещенных эхограммах авторы выделяют области размыва, аккумуляции и области, испытывающие за время между съемками и размыв, и аккумуляцию (рис. 1). Предлагается разбить продольники на малые участки с одинаковой дискретностью и рассчитывать объем переместившихся наносов на каждом шаге. При этом объем наносов в каждой точке на поверхности гряды принимается разным. В точке пересечения эхограмм вблизи гребня гряды он принимается наибольшим и равным величине эрозии на напорном склоне гряды и одновременно величине аккумуляции на тыловом склоне этой гряды, произошедших за время между съемками. В точке выше по течению он принимается меньшим на величину объема эрозии между нею и первой точкой и т. д. В точке ниже по течению он также принимается меньшим на величину объема аккумуляции между нею и первой точкой и т. д. В областях, в которых зона аккумуляции выше по течению перекрывается зоной эрозии ниже по течению, объем наносов в каждой точке принимается равным сумме оставшегося объема аккумуляции ниже по течению и доли объема эрозии выше по течению от этой точки. Итоговый РДН рассчитывается как среднее арифметическое частных объемов переместившихся наносов, деленное на время между съемками. Согласно авторам, этот метод дает результаты, сопоставимые с их вторым методом [21]. Тем не менее представляется, что дискретизация транспорта наносов при их структурном движении, не учитывающая целостность донных форм, не отвечает физической сути процесса, поэтому этот метод кажется ошибочным.

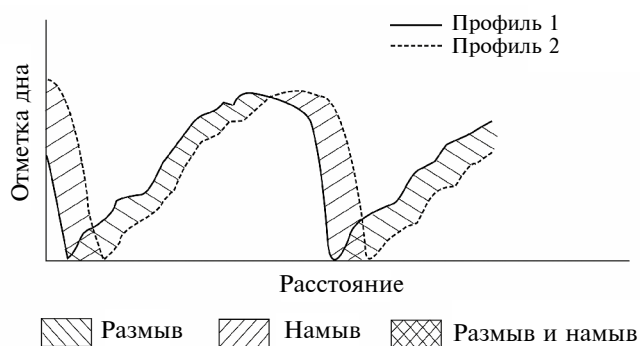


Рис. 1. Третий метод Д. Гаумана и Р.Б. Якобсона (согласно [21]).

ППЭЛ МНОГОЛУЧЕВЫМ ЭХОЛОТОМ

С появлением многолучевых эхолотов метод ППЭЛ получил новый импульс к развитию.

Метод АМВ, основанный на измерении характеристик гряд

Метод АМВ (Acoustic Mapping Velocimetry, AMV), развиваемый С. Бараньей и М. Мюстом с коллегами [26, 30], предлагает альтернативный способ определения скорости гряд. Данный метод основан на методологии ЛСПИВ (Large Scale Particle Image Velocimetry, LSPIV) [20]. Эта методология путем сопоставления разновременных изображений движущихся в потоке или перемещаемых потоком объектов, образующих паттерны, позволяет строить их скоростные поля. В целях измерения РДН в качестве изображений используются трансформированные карты речного дна, а в качестве паттернов – характерные элементы гряд (подвалья или гребни).

Метод АМВ реализуется в несколько этапов. На первом этапе с помощью какого-либо инструмента (АДПТ, однолучевого или многолучевого эхолота) строятся карты речного дна за два срока и более, чаще всего используются многолучевые эхолоты как наиболее удобные инструменты. На втором этапе акустические карты дна трансформируются в эквивалентные растровые изображения. В процессе трансформации поле отраженных акустических сигналов преобразуется в непрерывную поверхность русла реки с сеткой, при этом для получения значений в узлах сетки используется линейная интерполяция между измеренными точками. Новая, покрытая сеткой поверхность преобразуется в растровое серое изображение с интенсивностью серого цвета от 0 до 255, при этом более светлые области соответствуют более глубоким зонам и, следовательно, более низким значениям абсолютной высоты дна.

На полученных “серых” изображениях дна идентифицируются характерные элементы гряд, перемещение которых будет отслеживаться. Смещение паттерна определяется для достаточно малых площадей (областей опроса). Паттерн внутри области опроса на первом изображении ищется на втором изображении внутри области поиска,

поблизости от своего предыдущего положения. Размеры областей опроса и поиска определяются предварительно эмпирически. Для каждого возможного смещения паттерна рассчитывается коэффициент кросс-корреляции. Смещение с наибольшим значением этого коэффициента принимается в качестве рабочего. Для определения смещения элементов гряд, кроме метода кросс-корреляции, используются также метод оптического потока и метод ХГПИВ (HGPIV, High Gradient Pattern Image Velocimetry) [45].

Скорость смещения паттерна определяется путем деления смещения на время между сопоставляемыми изображениями. Путем повторения этой процедуры для всех хорошо идентифицируемых паттернов осуществляется построение скоростного поля. Для вычисления РДН используется только продольная компонента вектора скорости.

Высоту гряд авторы метода [15, 30] определяют с помощью приложения БТТ [41, 42]. Коэффициент формы гряды в работах, посвященных данному методу, или принимается постоянным (по Саймонсу и др. [39]) [30], или определяется непосредственно из измерений [15]. РДН вычисляется по формуле (2).

Несомненное достоинство метода АМВ – возможность получения целостной картины динамики грядового дна.

Методы, основанные на определении объемов размыва и намыва

В 2008 г. Дж. Ниттроуэр, М. Эллисон и Р. Кампанелла предложили свой метод измерения РДН с помощью многолучевого эхолота [31] и апробировали его на р. Миссисипи. Он заключается в следующем. Выполняется съемка речного дна за два срока. Промежуток времени между съемками должен быть таким, чтобы гряды переместились на расстояние, меньшее своей длины. Для расчетов используются растровые изображения рельефа дна, покрытые расчетной сеткой достаточного разрешения.

Изображения дна за последовательные сроки сравниваются. В области движения гряд выделя-

ются четырехсторонние полигональные панели. Геометрия каждой панели уникальна.

Высотные отметки дна привязаны к поверхности уровня воды (возможно потому, что измерения проводились в устьевой зоне). Так как поверхностью отсчета является отметка уровня воды, то размыв напорного склона гряды дает положительное значение изменения отметок дна, а намыв тылового склона – отрицательное.

Расчеты рассматриваемым методом основаны на измерениях намыва на тыловом склоне гряды. Для каждой панели измеряется общая площадь намыва на тыловых склонах гряд $\sum S_n$ (n – число гряд), и по данным в узлах сетки рассчитывается среднее вертикальное смещение отметок дна ΔZ . Среднее по панели смещение гряд вниз по течению ΔX рассчитывается путем деления общей площади намыва на число гряд и на эффективную ширину панели $B_{эф}$:

$$\Delta X = \frac{\sum S_n}{nB_{эф}}. \quad (5)$$

Эффективная ширина панели учитывает репрезентативный изгиб гребней гряд, поэтому она всегда несколько больше, чем ширина панели.

Удельный РДН рассчитывается как

$$q_r = (1-p) \frac{\Delta X \Delta Z}{\Delta t}. \quad (6)$$

Значения удельного РДН для панелей, пересекаемых расчетным створом, осредняются для получения среднего удельного РДН. Полный РДН рассчитывается как произведение среднего удельного РДН и ширины поля грядового релье-

фа. Полный РДН по участку рассчитывается как среднее частных полных расходов.

Авторы указывают на наличие систематической погрешности, преуменьшающей РДН, которая возрастает с ростом пройденного между съемками расстояния. Погрешность равна заштрихованной площади на рис. 2. В статье [31] говорится, что разработан алгоритм расчета данной погрешности в зависимости от отношения величины продольного сдвига к длине гряды на основе синусоидальной модели грядового рельефа.

Метод ИССДОТв2 (Integrated Section Surface Difference Over Time – version 2, ISSDOTv2) разрабатывается Д. Абрахамом с коллегами с начала 2000-х гг. [12]. Он основан на использовании многолучевых эхолотов и направлен на измерение объема размыва, образовавшегося за время между двумя последовательными съемками на участке русла между двумя назначенными продольниками. Этот метод отталкивается от метода Ф. Экснера и модифицирует его следующим образом. Скорость гряд представляется традиционным образом как отношение отрезка Δx , пройденного грядой за время между последовательными измерениями Δt , к этому времени:

$$q_r = (1-p) \alpha h_r \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (7)$$

Произведение $h_r \Delta x$ представляется как объем донных наносов на единицу ширины русла ΔW , переместившийся за время Δt :

$$\Delta W = h_r \Delta x, \quad (8)$$

$$q_r = (1-p) \alpha \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (9)$$

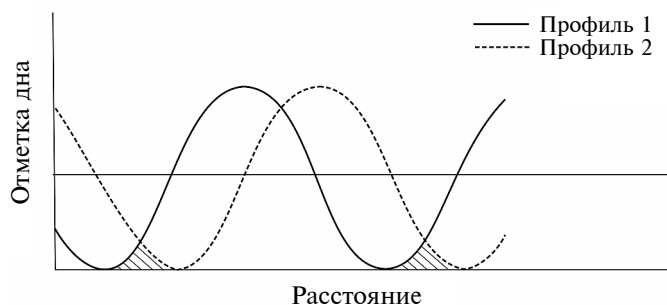


Рис. 2. Область, не учитываемая методом Дж. Ниттроуэра, М. Эллисона и Р. Кампанеллы (согласно [31]).

Схематически этот подход представлен на рис. 3. Здесь отрезки $AB = CD = \Delta x$, $AD = BC = h_r$, а объем ΔW равен площади прямоугольника $ABCD$. Геометрически площадь прямоугольника $ABCD$ равна площади параллелограмма $ABEF$, которая соответствует объему наносов на напорном склоне гряды, размытому за время Δt . На практике при сопоставлении реальных съемок дна часть этого объема, выражаемая суммой площадей треугольников ABG и EFH , не учитывается. Это приводит к появлению систематической ошибки, величина которой тем больше, чем больше относительное смещение гряды за время Δt , т. е. чем больше $\Delta x/l_r$. Авторами метода [38] аналитически установлено, что величина теряемого объема равна $C_r^2 \Delta t h_r / (2l_r)$. Так как сам метод не предполагает измерения характеристик гряд, то на основе того, что при $\Delta t = 0$ систематическая ошибка также равна нулю, авторы предлагают проводить многократное эхолотирование одного и того же участка через разные интервалы времени, строить зависимость $q_{\text{тизм}}(\Delta t)$ и экстраполировать эту зависимость до оси ординат. Точка пересечения линии экстраполяции с осью ординат должна дать реальную величину РДН.

РДН в выбранной полосе определяется как сумма всех объемов размыва на данной полосе, умноженная на коэффициент формы гряды, деленная на время между съемками и деленная на число гряд [14]. Метод ИССДОТв2 считается применимым в случае, если разница между объемами размыва и намыва $\leq 20\%$.

Выраженный недостаток методов Нитроуэра–Эллисона–Кампанеллы и ИССДОТв2 – неучет доли РДН, которая тем больше, чем больше промежутки времени между измерениями.

Авторы метода ИССДОТв2 точнее, чем авторы [31], оценивают величину упускаемого объема и предлагают способы решения данной проблемы: многократное эхолотирование или измерение характеристик гряд; тем не менее нельзя сказать, что это как-то облегчает задачу по сравнению с применением технологии однолучевого эхолота.

Возможно, что многолучевые эхолоты не столько позволяют создать новые методы измерения РДН, сколько дают возможность усовершенствовать традиционный метод определения этой величины через характеристики гряд путем сокращения времени полевых измерений и возможности назначить сколь угодно большое число продольников, что должно способствовать повышению точности измерений.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ АДПТ

Использование АДПТ для измерения РДН основано на представлении о существовании так называемого “активного слоя”, в котором происходит транспорт донных частиц. Этот слой характеризуется толщиной, концентрацией в нем наносов и скоростью движения (самого слоя или частиц в слое) [43]. РДН на основе этих представлений рассчитывается с помощью “кинематической модели” [19, 24, 28, 35, 36]:

$$q_r = V_q \delta_a c_a, \quad (10)$$

где V_q – средняя скорость репрезентативной донной частицы, δ_a – толщина активного слоя, c_a – объемная концентрация наносов в активном слое. С использованием АДПТ измеряется только скорость частиц в активном слое.

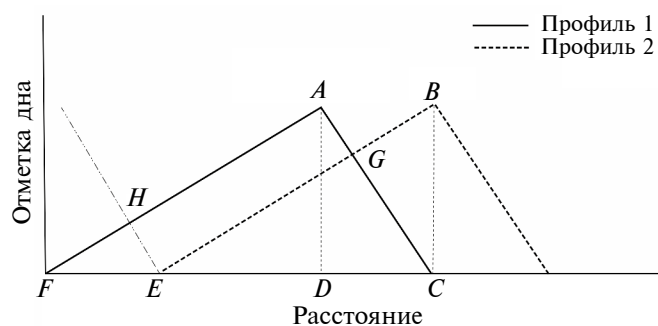


Рис. 3. Метод ИССДОТв2 (согласно [12]).

Как известно, АДПТ имеют специальный сигнал для идентификации дна и его положения – режим измерения “боттом треккинг” (“Bottom Tracking”). Этот сигнал использует более длинные импульсы, и в случае подвижного дна дает большие погрешности. Эта ошибка V_a может быть использована для расчета средней скорости поверхности дна [35]:

$$V_a = V_{GPS} - V_{BT}, \quad (11)$$

где V_{GPS} – скорость судна по GPS-навигатору, V_{BT} – показания сигнала “боттом треккинг”. В случае, когда судно неподвижно, $V_a = V_{BT}$. В расчетах РДН для мелких грунтов принимается $V_a = V_u$ без поправок [36].

При практической реализации данного положения встречается ряд затруднений. Возвращающийся сигнал не только отражается от донных наносов, но также может рассеиваться от взвешенных наносов у дна и от неподвижных частиц, лежащих на дне, а также от морфологических элементов русла [19].

На точность измерения скорости поверхности дна влияют технические характеристики прибора и заложенные в него инструментальные коэффициенты [19]. Существенное влияние на результат оказывает рабочая частота, так как разные частоты по-разному взаимодействуют с частицами разных размеров. В общем случае чем меньше частица, тем слабее отраженный сигнал. При этом чем ниже частота, тем более крупными должны быть частицы, чтобы получить ощутимый обратный сигнал. Достаточно высокую чувствительность в широком диапазоне частиц показывают высокие частоты (3000–4000 кГц) [28], однако их использование в определенных условиях приводит к “рассеиванию” активного слоя, когда за дно принимаются взвешенные наносы, вследствие чего скорость поверхности дна завышается. Использование низких частот в неподходящих условиях может привести к недоучету мелких донных частиц и учету совершенно неподвижного дна и, следовательно, к занижению скорости поверхности дна [19]. В целом, качество определения скорости дна оказывается в прямой зависи-

мости от чувствительности прибора к гранулометрическому составу наносов.

На измеряемое значение скорости поверхности дна влияет также длина импульсов [28]: фиксируемая скорость возрастает с длиной импульса. Рост длины импульса приводит к увеличению толщины изучаемого слоя, и в него попадают взвешенные частицы, движущиеся с большей скоростью.

Большой недостаток измерений РДН с помощью АДПТ – то, что из трех необходимых для получения РДН величин измеряется только скорость активного слоя. Его толщина и концентрация движущихся донных частиц или рассчитываются, или назначаются постоянными [19, 24, 28, 35, 36].

Распространена [24, 28] методика оценки толщины активного слоя по методу Л. Ван Рейна [43]:

$$\delta_a = 0.3D_*^{0.7}T^{0.5}d_{50}, \quad (12)$$

здесь D_* – безразмерный диаметр частиц, T – транспортный параметр Ван Рейна. Не менее часто [24, 28] для оценки толщины активного слоя применяется определение Х. Эйнштейна: $\delta_a = 2d_{50}$. Также встречаются значения $3d_{50}$, $5d_{50}$ и др. [19].

Концентрация частиц в слое преимущественно [19, 24, 28, 35, 36] принимается постоянной: $c_a = 1 - p$, здесь p – пористость донных отложений, тогда как фактическая пористость в активном слое должна быть больше. Реже [28] концентрация частиц рассчитывается по методу Ван Рейна [43]:

$$c_a = 0.18c_{\max} \frac{T}{D_*}, \quad (13)$$

где c_{\max} – максимальная концентрация донных частиц, равная 0.65.

Таким образом, метод АДПТ более чем на половину гипотетически расчетный. Достоинство этого метода – близость прибора к универсальности, так как с помощью него также измеряются расход воды и расход взвешенных наносов [7].

ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный обзор современных методов измерения РДН в реках с мелким аллювием показывает, что все эти методы имеют большие или меньшие недостатки и ту или другую ограниченность применения.

Важнейшие свойства транспорта донных наносов равнинными реками – его структурность и дискретность. Большая часть донных частиц перемещается в составе замкнутых морфологических образований и проходит путь напорного склона русловой формы к подвалю, где пребывает в покое до тех пор, пока вся гряда не переместится на расстояние, равное ее длине. Таким образом, движение донных наносов объективно не является непрерывным. Кроме того, скорость движения частицы по поверхности русловой формы меняется: она увеличивается вдоль лобового склона к гребню, а в подвалю гряды может иметь место движение частиц в обратном направлении в соответствии с закручиванием воды в вальце. Аналогично (периодически) вдоль грядового дна меняется и РДН, что лишает смысла восприятие его как створной характеристики. Более-менее постоянная величина – именно скорость гряды, поэтому в гидролого-морфологической теории руслового процесса [5] гряда принята за единицу движения.

Следовательно, фактический осредненный (или интегральный) РДН может быть измерен только методами, рассматривающими гряды как целостные морфологические образования, т. е. в данном случае методами эхолотирования. Методы, основанные на фиксации скорости движения частиц или измерении объема транспорта в каких-либо точках на поверхности гряд или между ними, не могут дать целостного представления о величине РДН и отражают лишь его локальные значения.

В связи с тем, что к настоящему времени обширных исследований по оценке точности и сравнению разных методов измерения, основывающихся на эхолотировании, не выполнено, давать однозначные рекомендации о предпочтительности одного из этих методов преждевременно.

Перспективы развития видятся в увеличении частоты и количества измерений методами эхолотирования в различных гидравлических условиях и во взаимном сравнении получаемых результатов. При этом важны как полевые, так и лабораторные исследования. Первые предоставляют широчайший спектр гидравлических условий, вторые позволяют выполнять не только взаимные сравнения методов, но и оценивать их точность благодаря наличию данных о фактическом расходе наносов.

ВЫВОДЫ

Транспорт донных наносов в реках с песчано-гравийным дном происходит в грядовой форме, когда преимущественная часть донных наносов перемещается не непрерывно, а внутри замкнутых морфологических образований.

В настоящее время измерения расхода донных наносов в таких реках проводятся методами, основанными на использовании четырех групп приборов: донных батометров, однолучевых эхолотов, многолучевых эхолотов и акустических Допплеровских профилографов течений.

Все эти методы имеют те или иные преимущества и недостатки. Тем не менее наиболее перспективными представляются методы, основанные на использовании эхолотов, так как они позволяют непосредственно учесть целостность грядовых образований.

Исследований, посвященных взаимному сравнению разных подходов, основанных на эхолотировании, и оценкам их точности, немного, поэтому делать определенные выводы о преимуществе какого-либо из них не представляется возможным.

Развитие методов измерения расхода донных наносов в реках с песчано-гравийным дном напрямую зависит от частоты и количества измерений разными методами, основанными на эхолотировании, в разнообразных гидравлических условиях и от взаимного сравнения результатов. При этом важны как натурные, так лабораторные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика активных гряд в русле реки Терек // *Вод. ресурсы.* 2017. Т. 44. № 2. С. 147–157.
2. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков. Т. 2. Наносы и русло. М., 1955. 323 с.
3. *Вершинин Д.А., Инишев Н.Г., Тарасов А.С.* Результаты полевых измерений расходов донных наносов экспериментальным батометром на большой реке // *Тр. Всерос. конф. “Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития”.* СПб.: Аграф+, 2017. С. 107–110.
4. *Гришанин К.В.* Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
5. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
6. *Копалиани З.Д., Петровская О.А.* База данных “Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках” (свид. гос. регистрации базы данных № 2017620992) // *Официальный бюллетень “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем” (ISSN 2313-7487).* 2017. № 9. http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017)
7. *Морейдо В.М., Чалов С.Р., Иванов В.А., Красынь Е.А.* Применение доплеровских измерителей течений для оценки стока наносов // *Маккавеевские чтения, 2020, Москва / Под ред. П.С. Чалова.* М., 2021. С. 35–45.
8. РД 52.08.163-88. Дополнение к наставлению гидрометрическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 90 с.
9. *Сидорчук А.Ю.* Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд // *Вод. ресурсы.* 2015. Т. 42. № 1. С. 31–44.
10. *Шамов Г.И.* Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 378 с.
11. A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams. Rep. № 2. Equipment used for sampling bed load and bed material. Iowa, 1940. 57 p.
12. *Abraham D., Kuhnle R.A., Odgaard A.J.* Validation of bed-load transport measurements with time-sequenced bathymetric data // *J. Hydraulic Engineering.* 2011. V. 137. Iss. 7. P. 723–728.
13. *Abraham D., McAlpin T., Jones K.* Bed-load measurements on large, sand-bed rivers in the United States // *Proc. Int. Conf. “River Flow”.* Lyon-Villeurbanne, 2018. 8 p.
14. *Abraham D., McAlpine T., May D.P., Pratt T., Shelley J.* Update on ISSDOTv2 method for measuring bed-load transport with time sequences bathymetric data // *Proc. 10th Federal Interagency Sedimentation Conf.* Reno, Nevada, USA, 2015. 10 p.
15. *Baranya S., Fleit G., Muste M., Tsubaki R., Jozsa J.* Bed-load estimation in large sand-bed rivers using Acoustic Mapping Velocimetry (AMV) // *Geomorphol.* 2023. V. 424. 14 p.
16. *Braatz D.A., Tucker R.L.* A new series of sediment collectors for developing bed load sediment budgets and restoring streams // *Proc. 7th IAHS Sci. Assembly, Sympos. S1. Foz do Iguaçu, Brazil: IAHS Publ. № 291.* 2005. P. 222–226.
17. *Cavaliere I., Schippa L.* Dune bed statistical analysis using multibeam echosound survey data // *Proc. 11th Int. Conf. Fluvial Hydraulics “River Flow”.* Kingston and Ottawa, Canada, 2022. 9 p.
18. *Conevski S., Guerrero M., Winterscheid A., Ruther N.* Comprehensive Analysis of the Bottom Tracking features measured by ADCPs in Riverine Environments // *Proc. 39th IAHR World Congress.* Granada, Spain, 2022. 10 p.
19. *Conevski S., Winterscheid A., Ruther N., Guerrero M., Rennie C.* Evaluation of an acoustic Doppler technique for bed-load transport measurements in sand-bed rivers // *Proc. Int. Conf. “River Flow”.* Lyon-Villeurbanne, 2018. 8 p.
20. *Fujita I., Muste M., Kruger A.* Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications // *J. Hydraulic Res.* 1998. V. 36. № 3. P. 397–414.
21. *Gaeuman D., Jacobson R.B.* Field assessment of alternative bed-load transport estimators // *J. Hydraulic Engineering.* 2007. V. 133. Iss. 12. P. 1319–1328.
22. *Gray J.R., Laronne J.B., Marr J.D.G.* Bedload-surrogate monitoring technologies. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5091. 2010. 37 p.
23. *Gutierrez R.R., Mallma J.A., Núñez-González F., Link O., Abad J.D.* Bedforms-ATM, an open source software to analyze the scale-based hierarchies and dimensionality of natural bed forms // *SoftwareX.* 2018. V. 7. P. 184–189.
24. *Holmes R.R.* Measurement of bedload transport in

- sand-bed rivers: A look at two indirect sampling methods. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5091. 2010. P. 236–252.
25. *Hubbell D.W.* Apparatus and techniques for measuring bed-load. Geological Survey Water-Supply Paper 1748. Washington, 1964. 80 p.
26. *Kim D., Hao-Che H., Baranya S., Muste M.* Qualitative and quantitative acoustic mapping of bedform dynamics // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016. V. 50. P. 80–89.
27. *Kleinhans M.G.* Manual for the Delft Nile Sampler (DNS) at Utrecht. Netherlands, 2005. 9 p.
28. *Latosinski F.G., Szupiany R.N., Guerrero M., Amsler M.L., Vionnet C.* The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. V. 54. P. 124–135.
29. *Leary K.C.P., Buscombe D.* Estimating sand bed load in rivers by tracking dunes: a comparison of methods based on bed elevation time series // *Earth Surface Dynamics*. 2020. V. 8. 13 p.
30. *Muste M., Baranya S., Tsubaki R., Kim D., Ho H., Tsai H., Law D.* Acoustic mapping velocimetry // *Water Resour. Res.* 2016. V. 52. P. 4132–4150.
31. *Nittrouer J.A., Allison M.A., Campanella R.* Bedform transport rates for the lowermost Mississippi River // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Iss. 3.
32. Operating Instructions. 04.32 Bed-load transport meter type Arnhem. Giesbeek, Netherlands, 2003. 8 p.
33. *Petrovskaya O., Maltsev A.* Testing bed load transport formulas: a case study of the Lower Amur based on multi-beam echo-sounders (MBES) data // *Geogr. Environ. Sustainability*. 2022. V. 15. № 4. P. 214–221.
34. *Ratton P., Bleninger T.B., Pereira R.B., Gonçalves F.V.* Bedload sediment transport estimation in sand-bed rivers comparing traditional methods and surrogate technologies // *Applied Sci.* 2023. V. 13. № 5.
35. *Rennie C.D., Millar R.G., Church M.A.* Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profile // *J. Hydraulic Engineering*. 2002. V. 128 (5). P. 473–483.
36. *Rennie C.D., Villard P.V.* Site specificity of bed load measurement using an acoustic Doppler current profiler // *J. Geophys. Resour.* 2004. V. 109. 15 p.
37. *Schippa L., Cavalieri I.* Semiautomatic algorithm for the interpretation of the bedforms and statistical analysis // *WIT Transactions Ecol. Environ.* 2021. V. 250. P. 169–179.
38. *Shelley J., Abraham D., McAlpin T.* Removing systemic bias in bed-load transport measurements in large sand-bed rivers // *J. Hydraulic Engineering*. 2013. V. 139. № 10. P. 1107–1111.
39. *Simons D.B., Richardson E.V., Nordin C.F.* Bedload equation for ripples and dunes // *Geological Survey Professional Paper 462-H*. Washington: US GPO, 1965. 15 p.
40. *Thomas R., McArthur J., Braatz D., Welp T.* Sediment Management Methods to Reduce Dredging. Pt 2. Sediment Collector Technology // *ERDC TN-DOER-T13*. 2017. 11 p.
41. *Van der Mark C.F., Blom A.* A new and widely applicable bedform tracking tool // *Technical Report*. Enschede: Univ. Twente, 2007. 49 p.
42. *Van der Mark C.F., Blom A., Hulscher S.J.* Quantification of variability in bedform geometry // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. 11 p.
43. *Van Rijn L.C.* Sediment transport. Part I: Bed load transport // *J. Hydraulic Engineering*. 1984. V. 110 (10). P. 1431–1456.
44. *Van Rijn L.C., Gaweesh M.T.K.* New total sediment-load sampler // *J. Hydraulic Engineering*. 1992. V. 118. № 12. P. 1686–1691.
45. *You H., Kim D., Muste M.* High-gradient pattern image velocimetry (HGPIV) // *Advances in Water Resour.* 2022. V. 159. 13 p.
46. *You H., Muste M., Kim D., Baranya S.* Considerations on Acoustic Mapping Velocimetry (AMV) application for in-situ measurement of bedform dynamics // *Frontiers in Water*. 2021. V. 3. 17 p.