

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ С УЧЕТОМ ДИСКРЕТНОГО ХАРАКТЕРА ИХ ДВИЖЕНИЯ

В.М. Католиков, Р.В. Заварзин

*Государственный гидрологический институт
v.katolikov@mail.ru, zavarzr@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.09.2024

После доработки 01.10.2024

Принята к публикации 10.11.2024

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме методики корректного расчета расхода донных наносов, которая должна опираться на объективный механизм их движения. В настоящее время существует несколько методических предложений по расчету расхода донных наносов при их грядовой форме движения. Для проверки и сопоставления этих методик были проведены эксперименты в 100-метровом и 8-метровом гидравлических лотках при режимах течения, приближенных к условиям равнинных рек. Результаты этих экспериментов представлены в данной статье.

В ходе экспериментов при различных условиях течения были сформированы донные рельефы, на которых были выделены гряды и волны двух других уровней. Формулируется и обосновывается принципиальное различие между грядами — формами движения донных наносов с переносом массы, и волнами, являющимися формой поверхности раздела междудвигающимися грядами и расположенными ниже русловыми отложениями. Сопоставление расходов донных наносов, измеренных объемным (эталонным) способом непосредственно в лотке и рассчитанных по параметрам гряд и волн, показывает, что наиболее близким к эталонному является расход донных наносов, рассчитанный по параметрам гряд. При этом суммирование расходов наносов, полученных по параметрам гряд и волн других уровней, приводит к значительному завышению общего расхода наносов в среднем на 66%.

Кроме этого, в статье приводятся результаты сопоставления геометрических параметров гряд и волн, обосновывается вывод о необходимости учета только грядовой формы движения донных наносов при расчете их расхода и вывод о необходимости учета высоты волн при расчете гарантированных глубин при проектировании судоходных прорезей.

Ключевые слова: донные гряды, волновые формы, волны II уровня, высота гряд, длина гряд, высота волн, длина волн

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальным понятием, на котором базируется гидроморфологическая теория руслового процесса, является дискретность механизма движения донных руслоформирующих наносов. Понятие «дискретность транспорта речных наносов и руслового процесса» было введено в начале 50-х гг. XX в. Н.Е. Кондратьевым (Кондратьев, 1951, 1953, 2000). Неотъемлемым элементом дискретности (прерывистости) движения руслоформирующих наносов является целостность дискретных морфологических элементов (объектов), возникающих при движении массы наносов. На пространственной границе между

этими формами происходит разрыв непрерывности движения наносов в бесструктурной форме, т. е. относящихся к более низкому структурному уровню.

Именно наличие такого разрыва непрерывности движения наносов на границе между дискретными морфологическими формами и отличает гряды как дискретную форму движения донных наносов от волн на границе раздела между потоком и массойдвигающихся донных наносов.

В рамках методологического подхода МГУ понятие «дискретность» используется применительно к волнообразному русловому рельефу с выделением дискретных волн различных структурных уровней

в предположении, что все эти волны рельефа являются формами движения донных наносов (Чалов, 2008). Многие исследования (Сидорчук, 1984, 2005; Алексеевский, 1998), проведенные как в гидравлических лотках, так и на реальных реках, подтверждают, что действительно на дне потока формируются:

1) грядовые формы движения донных наносов (по терминологии ГГИ);

2) расположенные под грядами волны руслового рельефа.

Согласно гидроморфологической теории руслового процесса ГГИ, гряды, являясь формой движения донных наносов, переносят «массу» наносов. Волны, расположенные ниже, являются лишь формой границы раздела между водным потоком и инертными донными отложениями.

Динамическое различие этих волновых форм речного дна проявляется и в форме их взаимодействия с речным потоком. Первые из них (гряды) активно воздействуют на гидравлические характеристики потока и его кинематическую структуру, вторые не оказывают такого влияния и только отражают внутренние волновые свойства турбулентного потока.

Генетические различия между волнами разного порядка можно установить или доказать в ходе экспериментов в гидравлических лотках по степени их участия в переносе массы донных наносов, т. е. в расходе донных наносов, при равномерном установившемся режиме водного потока и движении донных наносов. С этой целью были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представляются в настоящей статье.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились по методике, разрабатываемой и многократно апробированной в Отделе русловых процессов ГГИ. Важнейшим условием проведения экспериментов является соблюдение условия динамического равновесия.

Согласно методике, 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 расходов наносов в конце лотка, а также неизменность параметров русловых форм во времени и по длине рабочего участка лотка (Клавен, Копалиани, 2011).

Экспериментальные исследования проводились в Русловой лаборатории ГГИ. Всего было проведено семь экспериментов, из них 3 в лотке длиной 100 м и 4 в лотке длиной 8 м (табл. 1).

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.

На первых подготовительных этапах экспериментов в гидравлическом лотке формируется грядовое дно, для этого в лоток с ровным песчаным дном подается заданный расход воды. Во время данного этапа задается положение, соответствующее необходимой глубине потока. После окончания подготовительного этапа и достижения условия динамического равновесия по всей длине рабочего участка лотка образовались гряды.

На рис. 1 представлены фотографии грядового дна, полученного в ходе первого эксперимента в 100-метровом лотке и эксперимента в 8-метровом лотке. На фотографиях видно, что в 100-метровом лотке грядовый рельеф состоит из трехмерных гряд, расположенных в хаотичном порядке. По ширине лотка расположено в среднем от 5 до 10 гряд. При этом часто встречаются гряды, гребни

Таблица 1. Условия экспериментов

Table 1. Experimental conditions

Эксперимент №		Q , л/с	$H_{\text{пот}}$, см	$V_{\text{ср}}$, 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

*Время эксперимента без учета времени формирования донного рельефа.

Таблица 2. Гранулометрический состав донных наносов

Table 2. Granulometric composition of bed load

	$d_{10\%}$, 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



Рис. 1. Грядовое движение донных наносов в первом и в четвертом экспериментах:

А) 100-метровый лоток; Б) 8-метровый лоток

Fig. 1. Dunes movement in the first and fourth experiments: a) 100-meter flume; b) 8-meter flume

которых наползают друг на друга, что приводит к формированию гряд с несколькими гребнями. В 8-метровом лотке гряды также трехмерны, по ширине лотка расположены 1–3 гряды.

Для получения продольных профилей грядового рельефа дна осуществлялось повторное продольное эхолотирование. В 100-метровом лотке первый, второй и третий продольники были расположены на расстоянии 30, 50 и 70 см от правого стекла соответственно. Длина каждого продольника составила 600 см. Временной интервал между измерениями каждого продольника в первом эксперименте составлял 15–16 минут, а во втором и в третьем – 27 минут. В 8-метровом лотке измерения осуществлялись также по трем продольникам, расположенным на расстоянии 5.25, 10.5 и 15.75 см от правого стекла. Интервалы между измерениями в 4-м эксперименте составляли 10 минут, а в 5, 6 и 7 – 15 минут.

В 100-метровом лотке длина участка, покрытого песком, составляла 20 м. При этом эхолотирование параметров гряд проводилось лишь на 6-метровом участке. В 8-метровом лотке длина участка укладки песка была 5 м, эхолотирование дна по продольникам проводилось на участке длиной 2.5 метра.

Каждый эксперимент проходил в несколько этапов длительностью по 2–4 часа. После окончания каждого этапа подача воды прекращалась

и проводилось измерение выноса песка. Таким образом, в каждом эксперименте было получено от 3 до 5 измерений выноса песка. Такое количество измерений позволяет получить достаточно точную среднюю величину выноса песка. Измеренный объем песка делится на длительность эксперимента, и таким образом вычисляется эталонный расход донных наносов.

Измерения выноса проводились без высушивания и взвешивания, и данные измерений отражают расход наносов в рыхлом теле. По этой причине применение расчетных формул осуществляется без учета коэффициента пористости.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выделения гряд различных типов продольные профили были обработаны методом последовательной интерполяции. Именно данный метод выделения элементов руслового рельефа применяется в работе (Сидорчук, 2005).

Суть данного метода заключается в следующем. На продольном профиле дна выделяются точки смены градиента с отрицательного на положительный. Данные точки фиксируют ложбины между волнами первого уровня. Далее ложбины соединяются линией, которая определяет поверхность волн второго уровня. Выделение ложбин на волнах второго уровня делается также путем определения

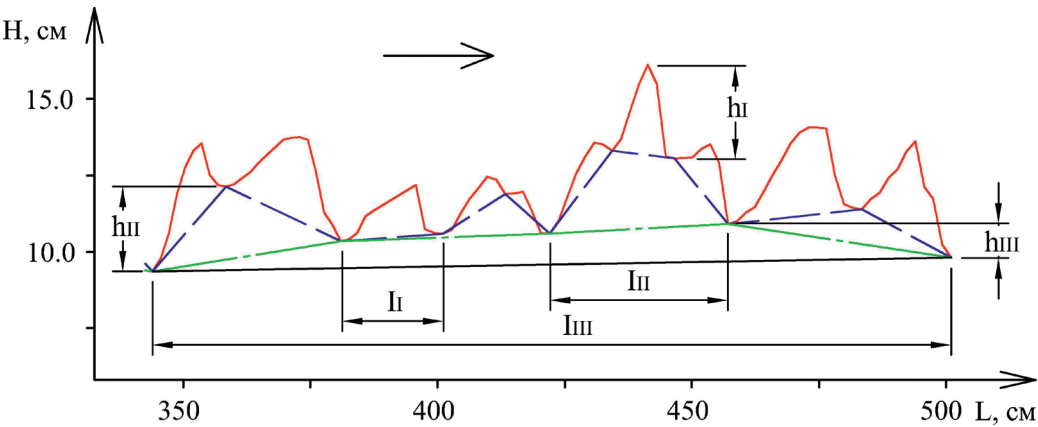


Рис. 2. Пример выделения волн различных уровней (эксперимент 3, продольник 5).
 h_I, h_{II}, h_{III} — высоты волн I, II и III уровней, l_I, l_{II}, l_{III} — длины волн I, II и III уровней

Fig. 2. Example of identifying waves of different levels (experiment 3, longitudinal 5).
 h_I, h_{II}, h_{III} — heights of waves of levels I, II and III, l_I, l_{II}, l_{III} — lengths of waves of levels I, II and III

точек смены градиента. Поверхность волн третьего уровня определяется аналогично путем соединения линий подвалов волн предыдущего уровня. Такая обработка продолжается до тех пор, пока на профиле не останется ни одной точки смены градиента.

Геометрические характеристики иерархического комплекса волн

В результате обработки продольных профилей дна удалось выделить волны трех уровней. Пример выделения волн представлен на рис. 2. На рисунке красная линия является поверхностью волн I порядка, синяя линия — волн II порядка и зеленая линия — волн III порядка. Отметки на

вертикальной оси отсчитываются от дна лотка, отметки горизонтальной оси — от начала рабочего участка.

Каждая выделенная на профиле волна была измерена. В данном случае высота волн представляется как превышение высотной отметки гребня над нижерасположенным подвалом, а длина волн — как разность продольных отметок ложбин, ограничивающих волну. На рис. 2 приведен пример измерения геометрических характеристик нескольких волн разных уровней.

В ходе обработки было обнаружено большое количество волн I уровня с высотами менее 0.3 см, тогда как средняя высота волн, измеренная ручным способом, составляет от 1.3 до 2.0 см. Включение

Таблица 3. Характеристики длин волн в 100-метровом лотке
Table 3. Wavelength characteristics in the 100-meter hydraulic flumes

Уровень	Характеристики	Эксперимент 1 ($Q = 35$ л/с, $H = 10.0$ см.)	Эксперимент 2 ($Q = 55$ л/с, $H = 15.0$ см.)	Эксперимент 3 ($Q = 45$ л/с, $H = 12.5$ см.)
I	N	475	475	485
	l_{cp} , см	14.6	14.7	14.6
	h_{cp} , см	1.76	1.71	1.76
	$h_{cp} \cdot k_{cp}$, см	2.38	2.31	2.38
II	N	132	139	141
	l_{cp} , см	46.8	48.3	46.1
	h_{cp} , см	1.78	1.57	1.67
III	N	29	35	42
	l_{cp} , см	141.0	152.0	131.2
	h_{cp} , см	1.51	1.18	1.12

в расчет средней высоты волн выступов высотой менее 0.3 см приводит к неоправданному занижению средней высоты волны. Исходя из этого при расчете средней высоты волн I уровня проводилась фильтрация выступов высотой менее 0.3 см.

Осредненные характеристики волн трех уровней, зафиксированных при анализе рельефа в экспериментах в 100-метровом лотке, представлены в табл. 3, в которой N — количество волн, $l_{\text{ср}}$ — средняя длина волн, $h_{\text{ср}}$ — средняя высота волн.

Обработка рельефа дна, полученного в ходе экспериментов в 8-метровом лотке, также проводилась с фильтрацией малых выступов высотой менее 0.3 см. В данных экспериментах из-за малой длины участка эхолотирования удалось выделить волны лишь двух уровней.

Как видно на рис. 1, гряды, сформировавшиеся на песчаном дне в обоих лотках, трехмерные. Гряды такого типа в каждой точке поперечного профиля имеют разную высоту и хаотичную плановую форму. По этой причине во время эхолотирования измеряемый продольный створ пересекает гряды в самых разных точках их гребня. Кроме того, большая часть значений высоты гряд на продольнике измерена не в точке наибольшей высоты гряды, а ближе к периферии гребней. В итоге при осреднении высот гряд по продольному профилю получится не истинная средняя высота гряд, а ее заниженная величина. Это обстоятельство приводит к неоправданному занижению удельного расхода донных наносов.

В работе (Замышляев, Снищенко, 1982) были предложены поправочные коэффициенты, позволяющие корректировать измеренную высоту волн I уровня (гряд). Данные коэффициенты различны для каждого типа поперечного профиля гряды и находятся в диапазоне от 1.2 до 1.6. В условиях отсутствия специальных исследований по типизации трехмерных гряд поправочный коэффициент в настоящей работе при расчете средней высоты гряд был принят равным 1.35. Для волн II уровня коэффициент не применялся.

Анализируя данные о количестве волн различных уровней в двух экспериментах, можно заметить, что при увеличении уровня волн их количество уменьшается в 3–4 раза, тогда как средняя длина волн — увеличивается в 3–4 раза. При этом средняя высота волн при увеличении уровня во всех экспериментах уменьшается. В первых трех экспериментах высоты волн I уровня выше волн II уровня на 40%, тогда как волны II уровня выше волн III уровня на 24%, то есть уменьшаются в среднем на 27%.

Динамика иерархического комплекса волн

Согласно гидроморфологической теории руслового процесса перемещение гряд (микроформ) происходит путем перемещения по их напорному склону частиц песка (донных наносов) в бесструктурной форме под действием крупномасштабных вихрей в потоке. Перемещаясь по напорному склону, частицы песка попадают в подвалье, где они оседают на время полного перемещения гряды. Побочни и осередки (мезоформы) перемещаются за счет движения по их поверхности гряд. Гряды, перемещающиеся по напорному склону мезоформ, поступают в подвалье мезоформы, где остаются на время, соответствующее полному перемещению мезоформы. Из этого следует, что измерение расхода донных наносов необходимо проводить либо по параметрам микроформ, либо отдельно по параметрам мезоформ.

Согласно подходу МГУ, рельеф дна состоит из волн шести уровней (порядков) (Алексеевский, 1998; Сидорчук, 2015), которые в зависимости от гидравлических условий могут перемещаться либо активно, либо пассивно (Сидорчук, 2015). Активные волны перемещаются под прямым действием скоростей в потоке, тогда как пассивные — за счет транспорта по их поверхности активных волн и транзитных наносов, движущихся в бесструктурной форме. При этом в русловом рельефе могут находиться сразу несколько активных уровней волн, расположенных друг на друге. В таком случае измерение расхода донных наносов необходимо проводить, суммируя расходы всех активных типов волн и расход транзитных наносов.

Из вышесказанного следует, что для корректного анализа подхода МГУ необходимо определение характера движения волн. Для этого было выполнено сравнение продольных профилей, измеренных с временным интервалом. Анализу подвергались продольные профили, измеренные во всех экспериментах, но в данной статье приводятся рисунки только одного продольного профиля, измеренного в ходе третьего эксперимента (рис. 3 и 4).

На рис. 3 приведена динамика комплекса волн, где волны I уровня перемещаются по поверхности волн II уровня. На первом продольном профиле выделены и пронумерованы волны II уровня, также зафиксированы точки ложбин, являющихся границами между волнами. На втором профиле выделяются волны, найденные на первом продольнике; таким же образом идентифицируются волны на каждом последующем продольнике. Точки ложбин

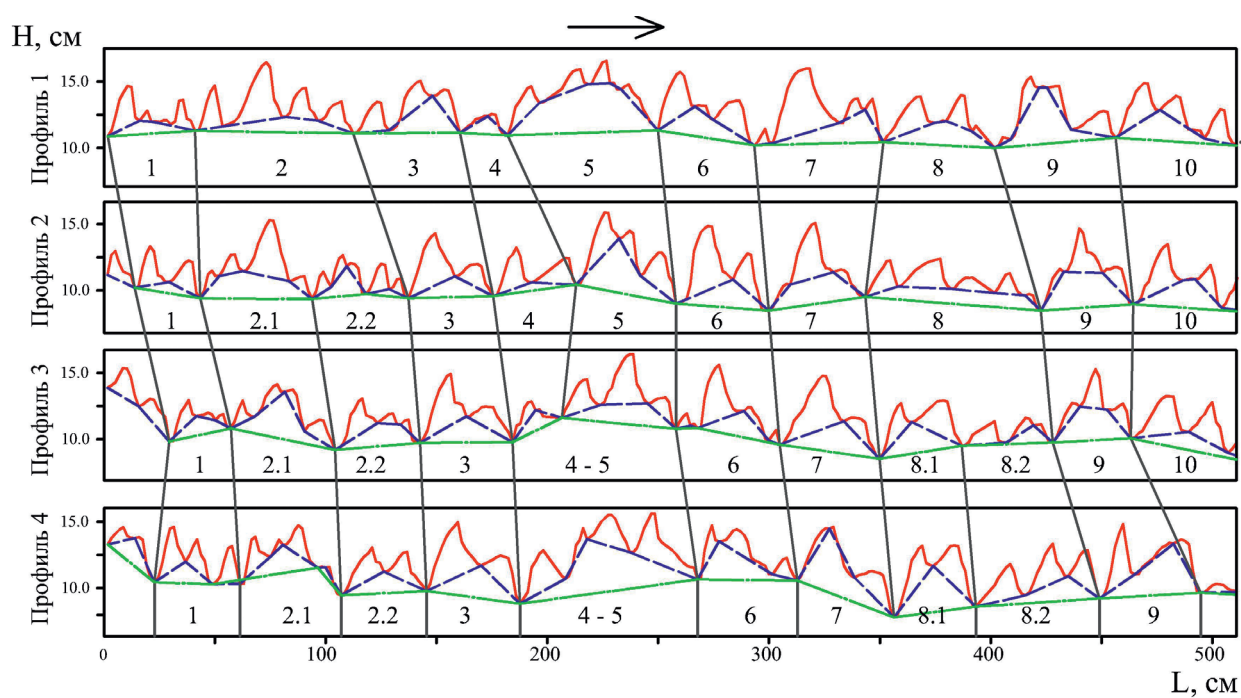


Рис. 3. Динамика комплекса волн I, II и III уровней (эксперимент 3, продольник 5)

Fig. 3. Dynamics of the complex of waves of levels I, II and III (experiment 3, longitudinal 5)

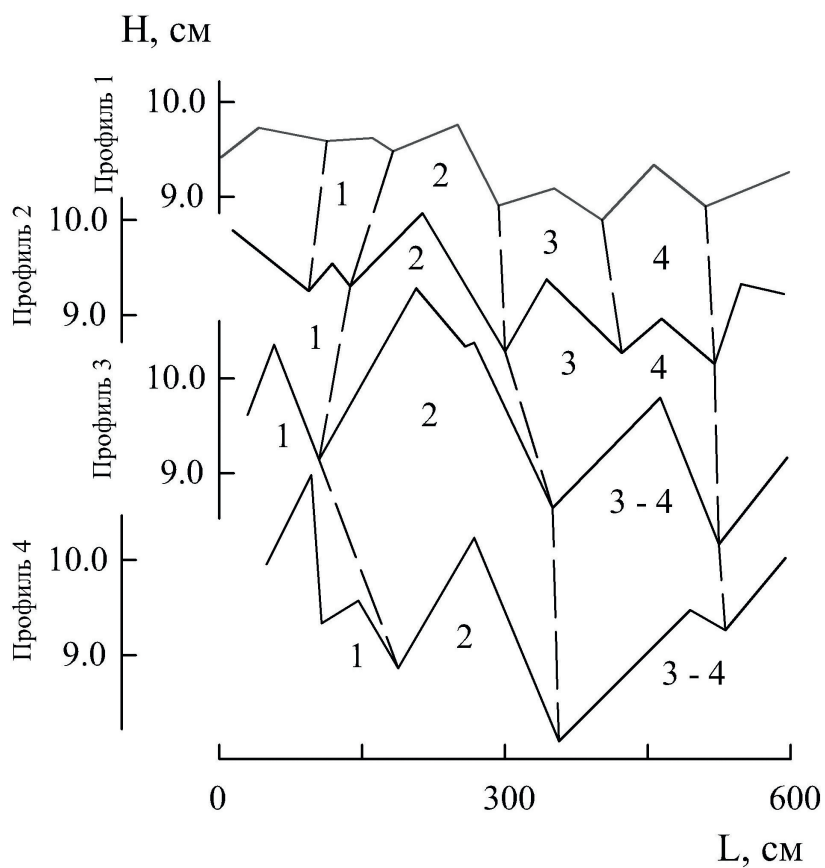


Рис. 4. Динамика волн III уровня (эксперимент 3, продольник 5)

Fig. 4. Dynamics of waves of level III (experiment 3, longitudinal 5)

каждой волны соединяются линией с ложбинами, найденными на следующем профиле, и таким образом фиксируются перемещения волн.

Как можно заметить на рис. 3, основная масса волн I уровня равномерно движется вниз по течению. Большинство волн, зафиксированных на первом профиле, легко опознаются на следующих профилях. За временной промежуток между измерениями форма волн изменяется несильно, т. к. форма волн находится под постоянным прямым воздействием турбулентных вихрей в потоке. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что волны I уровня являются активными.

Волны II уровня оказываются значительно менее стабильными. Положение гребней волн относительно их оснований меняется почти в каждом случае. Кроме того, часть волн, например волны 1, 4, 5, 7 и 8, имеют сдвиг одной из ложбин вверх по течению. Такие сдвиги объясняются изменением формы волн и не описывают их динамические характеристики. Также можно заметить на рисунке, что волны 2 и 8 на одном из этапов своего развития делятся на две волны, а волны под номерами 4 и 5, наоборот, соединяются в одну волну.

Согласно подходу МГУ, пассивные волны движутся путем накапливания в своем подвалье наносов, которые перемещаются в форме активных волн. Из этого следует, что активные волны, попадая в подвалье пассивной волны, должны терять свою форму и прекращать движение.

Анализируя движение основной массы волн II уровня, можно утверждать, что подвалья волн II уровня перемещаются одновременно с подвальями волн I уровня. Одновременно с этим волны I уровня, находясь в подвалье волны II уровня, не теряют свою форму. Волны двух уровней движутся одновременно. Таким образом, движение волн II уровня нельзя считать пассивным. Активными эти волны также нельзя назвать, т. к. они находятся под движущимися волнами I уровня и напрямую не взаимодействуют с потоком.

На рис. 4 приведена динамика волн III уровня. На всем 6-метровом участке лотка удалось выделить лишь 4 волны III уровня. При этом все четыре волны оказываются нестабильными. Волна 1 фиксируется лишь на первом и втором профиле, волна 2 на втором и третьем профиле расширяется вниз по течению, а волны 3 и 4 объединяются на третьем профиле. Корректно определить активность или пассивность волн данного уровня нельзя по тем же причинам, которые описаны выше для волн II уровня. Измерение сдвига волн данного уровня затруднено в силу нестабильности их формы.

Все вышеперечисленные выводы о характере движения иерархического комплекса волн относятся ко всем экспериментам.

Для расчета удельного расхода донных наносов как по методу ГГИ, так и по методу МГУ необходимо измерять параметры волн I уровня, которые, по определению ГГИ, являются грядами. Беря во внимание гипотезу о возможном участии волн II уровня в транспорте наносов, параметры этих волн необходимо также измерять для выполнения сравнительного анализа.

Оценка среднего смещения волн I уровня выполняется по характеристикам пространственно-временной корреляции массивов промерных данных. Такая технология нахождения скорости движения гряд подробно описана в работе (Костюченко, Заварзин, 2022), и данный подход хорошо себя зарекомендовал в ходе экспериментальной проверки (Заварзин, Петровская, 2023).

Ввиду случайного изменения формы волн II уровня измерения их сдвига проводятся по отметкам подвалей отдельных волн устойчивой формы.

Для применения данного метода отметки дна продольных профилей представляют в табличном виде. Далее для последовательно измеренных профилей находятся коэффициенты корреляции с различными сдвигами. Итоговая скорость гряд находится путем деления расстояния сдвига с наибольшей корреляцией на временной интервал. Данная операция проводится для всех измеренных продольных профилей дна. Полученные средние скорости волн I уровня для каждого продольного профиля осредняются, и итоговая скорость (C_r) приводится в таблицах 5–8.

Для измерения сдвига волн II уровня выполнялась ручная обработка промерных данных. Сдвиг волн измерялся исходя из положения их подвалей на каждом последующем измерении аналогично схеме на рис. 3. Для получения значения скорости сдвиг делится на время между измерениями, результаты приведены в таблицах 5–8. Сдвиг волн III уровня корректно зафиксировать невозможно ввиду их нестабильности (рис. 4).

Расход донных наносов

Одной из целей данной работы является определение степени участия волн различных уровней в транспорте донных наносов. По полученным характеристикам волн I и II уровней можно рассчитать расход наносов. Величина эталонного (фактического) расхода донных наносов измеряется по выносу песка в песколовку.

Подход, лежащий в основе всех существующих методов измерения расхода донных наносов

Таблица 4. Характеристики длин волн в 8-метровом лотке
Table 4. Wavelength characteristics in the 8-meter hydraulic flumes

Уровни	Характеристики	Эксперимент 4 ($Q = 2.9$ л/с, $H = 4.5$ см)	Эксперимент 5 ($Q = 3.5$ л/с, $H = 5.5$ см)	Эксперимент 6 ($Q = 4.5$ л/с, $H = 5.7$ см)	Эксперимент 7 ($Q = 6.0$ л/с, $H = 6.6$ см)
I	N	164	132	153	163
	$l_{\text{ср}}$, см	14.7	15.6	12.1	13.3
	$h_{\text{ср}}$, см	1.38	1.61	1.34	1.48
	$h_{\text{ср}} \cdot k_{\text{тр}}$, см	1.86	2.17	1.81	2.00
II	N	49	37	37	43
	$l_{\text{ср}}$, см	44.7	46.9	36.4	42.4
	$h_{\text{ср}}$, см	1.01	1.11	1.03	1.46

Таблица 5. Расход донных наносов, измеренный по волнам I уровня в 100-метровом лотке
Table 5. The discharge of bed load measured by level I waves in the 100-meter hydraulic flume

Струя №	Характери- стики	Эксперимент 1			Эксперимент 2			Эксперимент 3		
		$Q = 35 \text{ л/с}, H = 10 \text{ см}$			$Q = 55 \text{ л/с}, H = 15 \text{ см}$			$Q = 45 \text{ л/с}, H = 12.5 \text{ см}$		
			$Q_{\text{стр}},$ см ³ /мин	$Q_{\text{полн}},$ см ³ /мин		$Q_{\text{стр}},$ см ³ /мин	$Q_{\text{полн}},$ см ³ /мин		$Q_{\text{стр}},$ см ³ /мин	$Q_{\text{полн}},$ см ³ /мин
1 (0.0–30.0)	—	0	10.43	37.90	0	7.04	25.05	0	6.90	26.74
	α	0.54			0.52			0.51		
	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	2.30			2.51			2.46		
2 (30.0–50.0)	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.33	9.14		0.21	5.25		0.22	6.50	
	$q_{\text{эле}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.41			0.28			0.27		
	α	0.51			0.51			0.51		
3 (50.0–70.0)	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	2.61	8.79		2.19	5.38		2.39	6.48	
	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.38			0.22			0.31		
	$q_{\text{эле}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.50			0.25			0.38		
4 (70.0–100.0)	α	0.50	9.54		0.52	7.37		0.52	6.86	
	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	2.27			2.23			2.30		
	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.33			0.25			0.23		
	$q_{\text{эле}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.37			0.29			0.27		
	—	0			0			0		
Эталонный расход наносов $Q_{\text{эт}}, \text{ см}^3/\text{мин}$		30.51			28.71			48.59		

по характеристикам гряд, был сформулирован в начале XX в. австрийским исследователем Ф. Экснером (Ехнер, 1925). В последующем данный подход активно разрабатывался в ГГИ в рамках гидроморфологической теории руслового процесса. Согласно этому подходу, расход наносов рассматривается как функция высоты и скорости перемещения гряд: $q_{\text{эле}} = \alpha \cdot h_{\text{ср}} \cdot C_{\text{г}}$,

где $q_{\text{эле}}$ — элементарный расход донных наносов в рыхлом теле в объемных единицах, α — коэффициент формы гряды (в настоящей работе измеряемый для каждого профиля отдельно).
В табл. 4 и 5 представлены расчеты расхода донных наносов для экспериментов в 100-метровом лотке. Расход наносов в струях ($Q_{\text{стр}}$) рассчитывался путем осреднения удельных расходов на соседних

Таблица 6. Расход донных наносов, измеренный по волнам II уровня в 100-метровом лотке
Table 6. The discharge of bed load measured by level II waves in the 100-meter hydraulic flume

Струя №	Характеристики	Эксперимент 1			Эксперимент 2			Эксперимент 3		
		$Q = 35 \text{ л/с}, H = 10 \text{ см}$			$Q = 55 \text{ л/с}, H = 15 \text{ см}$			$Q = 45 \text{ л/с}, H = 12.5 \text{ см}$		
			$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$		$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$		$Q_{\text{стр}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$
1 (0.0–30.0)	—	0	7.03	29.30	0	3.55	15.18	0	6.84	21.65
	α	0.54			0.50			0.51		
	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	1.76			1.62			1.62		
2 (30.0–50.0)	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.29	7.12		0.17	2.97		0.33	5.12	
	$q_{\text{эле\text{м}}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.28			0.14			0.27		
	α	0.53			0.49			0.52		
	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	1.96			1.45			1.60		
3 (50.0–70.0)	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.42	7.40		0.22	3.58		0.29	4.48	
	$q_{\text{эле\text{м}}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.44			0.16			0.24		
	α	0.52			0.50			0.55		
	$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	1.67			1.60			1.65		
4 (70.0–100.0)	$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.35	7.75		0.25	5.09		0.23	5.21	
	$q_{\text{эле\text{м}}}, \text{ см}^2/\text{мин}$	0.30			0.20			0.20		
	—	0			0			0		
	Эталонный расход наносов $Q_{\text{эт}}, \text{ см}^3/\text{мин}$				30.51			28.71		

Таблица 7. Расход донных наносов, измеренный по волнам I уровня в 8-метровом лотке
Table 7. The discharge of bed load measured by level I waves in the 8-meter hydraulic flume

Характеристики	Эксперимент 4 ($Q = 2.9 \text{ л/с}, H = 4.5 \text{ см}$)	Эксперимент 5 ($Q = 3.5 \text{ л/с}, H = 5.5 \text{ см}$)	Эксперимент 6 ($Q = 4.5 \text{ л/с}, H = 5.7 \text{ см}$)	Эксперимент 7 ($Q = 6.0 \text{ л/с}, H = 6.6 \text{ см}$)
α	0.51	0.50	0.50	0.47
$h_{\text{ср}}, \text{ см}$	1.86	2.17	1.81	2.00
$C_{\text{г}}, \text{ см/мин}$	0.15	0.11	0.18	0.33
$B, \text{ см}$	21.0	21.0	21.0	21.0
$Q_{\text{полн}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	3.00	2.52	3.42	6.51
$Q_{\text{эт}}, \text{ см}^3/\text{мин}$	3.05	2.16	3.64	6.92

продольных профилях и умножения этого значения на ширину струи. Полный расход наносов ($Q_{\text{полн}}$) рассчитывается как сумма расходов в струях. Для сравнения в таблицу были добавлены данные эталонного расхода донных наносов $Q_{\text{эт}}$, измеренного по выносу песка.

В табл. 7 и 8 представлены расчеты расхода донных наносов для экспериментов в 8-метровом лотке. В этой серии экспериментов расход наносов рассчитывался сразу для всей ширины лотка.

Анализируя полученные данные о расходе донных наносов, можно заметить, что во всех экспериментах, кроме третьего, расход наносов, измеренный по волнам I уровня, оказывается наиболее близкими к эталонному расходу. Отклонение измеренного расхода по волнам I уровня от эталонного расхода не превышает 18.5%.

Расход, измеренный по волнам II уровня, во всех случаях, кроме эксперимента 7, оказывается ниже эталонного расхода в среднем на 37%. При попытке

Таблица 8. Расход донных наносов, измеренный по волнам II уровня в 8-метровом лотке**Table 8.** The discharge of bed load measured by level II waves in the 8-meter hydraulic flume

Характеристики	Эксперимент 4 ($Q = 2.9$ л/с, $H = 4.5$ см)	Эксперимент 5 ($Q = 3.5$ л/с, $H = 5.5$ см)	Эксперимент 6 ($Q = 4.5$ л/с, $H = 5.7$ см)	Эксперимент 7 ($Q = 6.0$ л/с, $H = 6.6$ см)
α	0.52	0.53	0.51	0.51
$h_{\text{ср}}$, см	1.01	1.11	1.03	1.48
$C_{\text{г}}$, см/мин	0.14	0.15	0.18	0.45
B , см	21.0	21.0	21.0	21.0
$Q_{\text{полн}}$, см ³ /мин	1.54	1.85	1.98	7.13
$Q_{\text{эт}}$, см ³ /мин	3.05	2.16	3.64	6.92

суммирования расходов по волнам I и II уровней ошибка возрастает и составляет в среднем 65.5%, но в ряде случаев, например в экспериментах 1, 5 и 7, ошибка превышает 100%.

Из всех приведенных результатов выбивается третий эксперимент. В этом эксперименте расход, измеренный по волнам I уровня, составляет лишь 55% от эталонного. В таком случае суммирование расходов волн двух уровней дает более точные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При появлении на дне потока микроформ (по терминологии гидроморфологической теории руслового процесса) непрерывное движение донных наносов в бесструктурной форме прерывается в подвалье, обуславливая целостность и замкнутость грядовой формы, переносящей «массу» донных наносов. Тот же разрыв непрерывности движения донных наносов в виде микроформ происходит при формировании на дне потока средних грядовых форм (ленточных гряд и побочней), обуславливая целостность и замкнутость этих форм.

Продольные профили грядового дна, измеренные в лабораторных условиях, показывают, что наличие на дне потока волн поверхности раздела (II уровень) не приводит к разрыву непрерывности движения донных наносов в грядовой форме по поверхности волн. Каждая волна II уровня закреплена за группой из 3–4 гряд (волн I уровня) и движется по отметкам их подвалей. Грядовые формы перемещаются в их подвалях вниз по течению, сохраняя непрерывность или неразрывность своего движения.

В силу всего вышесказанного объединение волн руслового рельефа в одну генетическую систему, с нашей точки зрения, неоправданно и необъективно, а изучение обоих видов «волн» должно основываться на разных методах. Необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на

анализ геометрических параметров волн II уровня.

Важнейшим выводом из данной работы является то, что при расчете расхода донных наносов следует учитывать только грядовые формы движения донных наносов первого уровня. Только лишь гряды переносят наносы, в то время как волны II уровня являются лишь формой, лежащей под грядами и не контактирующей с потоком напрямую.

В ходе измерения параметров гряд было обнаружено, что в массиве данных по высотам гряд содержится большое количество выступов на дне с высотами менее 0.3 см. Большое количество таких выступов приводит к неоправданному занижению средней высоты гряд. Для правильной идентификации гряд на профиле и необходима разработка специальных рекомендаций по вводу коэффициента фильтрации при выделении гряд на продольнике.

При расчете средней высоты гряд был применен коэффициент трехмерности, увеличивающий среднюю высоту гряд. Данный коэффициент определяется плановой формой гряд, однако в условиях отсутствия типизации плановой формы гряд коэффициент принимается равным 1.35. В дальнейшем для корректного применения данного коэффициента необходимо проведение работы по типизации плановой формы трехмерных гряд.

Справедливость применения двух вышеописанных приемов обработки подтверждается результатами сопоставления расхода наносов, измеренного по грядам, и эталонного, измеренного в песколовке.

При определении возможных максимальных отметок дна, например в судоходных прорезях, следует учитывать как высоту гряд, так и высоту волн II уровня. Для создания рекомендаций по учету волн II уровня при определении максимальных отметок дна необходимо проведение дополнительных исследований с использованием данных промеров на реальных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 202 с.

Заварзин Р.В., Петровская О.А. Измерения расхода донных наносов, перемещающихся в грядовой форме: экспериментальное исследование косвенных методов измерения // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 6. Ч. 1. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2023. 214–232 с.

Замышляев В.И., Снисченко Б.Ф. Статистическая оценка размеров песчаных гряд // Труды ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 89–96.

Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. 504 с.

Кондратьев Н.Е. Условия непрерывности и дискретности в применении к русловому потоку // Метеорология и гидрология, 1951. № 12. С. 36–41.

Кондратьев Н.Е. О дискретности русловых процессов // Проблемы русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат. 1953. С. 32–42.

Кондратьев Н.Е. Русловые процессы и деформации берегов водохранилищ. СПб.: Знак. 2000. 257 с.

Костюченко А.А., Заварзин Р.В. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 6. Ч. 1. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2023. С. 151–165.

Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1984. № 1. С. 17–23.

Сидорчук А.Ю. Структура руслового рельефа нижней Волги // Геоморфология. 2005. № 2. С. 86–96.

Сидорчук А.Ю. Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 1. С. 31–44.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 608 с.

Exner F. Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Vienna Academy of Science. 1925. 134 p.

ОБ АВТОРАХ

Католиков Виктор Михайлович — ФГБУ «Государственный гидрологический институт», кандидат технических наук, профессор, руководитель отдела русловых процессов.

Служебный адрес: 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23

E-mail: v.katolikov@mail.ru

Заварзин Руслан Витальевич — ФГБУ «Государственный гидрологический институт», младший научный сотрудник.

Служебный адрес: 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23

E-mail: zavarzr@gmail.com

PROBLEMS IN MEASURING BED LOAD DISCHARGE CONSIDERING THE DISCRETE NATURE OF ITS MOVEMENT

V.M. Katolikov, R.V. Zavarzin

State Hydrological Institute

v.katolikov@mail.ru, zavarzr@gmail.com

Abstract. The article addresses the important problem of the methodology for the correct calculation of bed load discharge, which should be based on an objective mechanism of its movement. Currently, several methodological proposals exist for calculating the discharge of bed load based on its dune-like movement. To test and compare these methods, experiments were conducted in 100-meter and 8-meter hydraulic flumes under flow conditions similar to those of lowland rivers. The results of these experiments are presented in this article.

During the experiments, under various flow conditions, bed reliefs were created, on which dunes and waves of two additional levels were identified. The fundamental difference between dunes, which are forms of bed load movement involving mass transport, and waves, which represent the interface between moving dunes and the underlying bottom sediments, is defined and substantiated. A comparison of bed load discharge measured by the reference (volumetric) method directly in the flume with that calculated based on dune and wave parameters shows that the discharge calculated from dune parameters is closest to the reference. However, summing the bed load discharge obtained from the parameters of dunes and waves at other levels leads to a significant overestimation of the total discharge by an average of 66%.

Furthermore, the article presents results comparing the geometric parameters of dunes and waves and substantiates the conclusion that only the dune form of bed load movement should be considered when calculating flow rates, and that wave height should be considered when calculating guaranteed depths for dredged channel design.

Keywords: bed dunes, wave forms, second-level waves, dunes height, dunes length, wave height, wave length

REFERENCES

- Alekseevskij N.I. Formation and movement of river sediments. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998. 202 s. (In Russ.)
- 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 ruslovyje protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putej*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 213–231. (In Russian)
- Zamyshljaev V.I., Snishhenko B.F. "Statistical assessment of the sizes of sand dunes" // *Trudy GGI*. 1982. Vyp. 278. p. 89-96. (In Russ.)
- Klaven, A.B., and Z.D. Kopalani. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011. — 504 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev N.E. Conditions of continuity and discreteness as applied to channel flow // *Meteorologija i gidrologija*, 1951. № 12. p. 36-41. (In Russ.)
- Kondrat'ev N.E. About the discreteness of channel processes // *Problemy ruslovykh processov*. L.: Gidrometeoizdat. 1953. p. 32-42. (In Russ.)
- Kondrat'ev N.E. Channel processes and deformations of reservoir banks. SPb.: Znak. 2000. P. 257 (In Russ.)
- Kostjuchenko A.A., Zavarzin R.V. Method of performing and processing measurements to determine the parameters of bed forms // *Vodnye puti i ruslovyje processy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putej*. Vyp. 6. Ch. 1. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova. 2023. p. 151-165. (In Russ.)
- Sidorchuk A.Ju. River bed relief structure // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 1984. № 1. p.17–23. (In Russ.)
- Sidorchuk A.Yu. The structure of channel landforms of lower Volga. *Geomorfologiya*. 2005;(2): p. 86-96. (In Russ.)
- Sidorchuk A.Ju. Estimation of sediment flow in a river channel taking into account data on active and passive dynamics of ridges // *Vodnye resursy*. 2015. T. 42, № 1. p. 31–44. (In Russ.)
- Chalov R.S. Channel studies: theory, geography, practice. T.1 Riverbed processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of formation of riverbeds. M.: Izd-vo LKI. 2008. P. 608. (In Russ.)
- Exner, F. "On the interaction between water and bedload in rivers." *Proc., Vienna Academy of Sciences, Section IIA*, 134, 1925.