ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48 **EDN HPLWPR**

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURE OF THE BOTTOM RELIEF IN THE CONDITIONS OF A DREDGING CUT

R. V. Zavarzin, V. M. Katolikov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

This study analyzes the structure of bedforms that develop within dredged navigation cuts. Numerous observations of channel bed transformation indicate that immediately following sediment excavation, bedforms begin to emerge on the cut bottom, with crest elevations exceeding the designed cut depth. It is concluded that the formation of bedform relief leads to a reduction in navigable channel depth. Observations of channel relief structure in lowland navigable rivers, documented in the authors' previous studies, reveal that the bottom relief consists of dunes and underlying waves, the heights of which are comparable to those of the dunes. Consequently, their formation further contributes to a decrease in the guaranteed depth within the cut. These losses are most significant in areas of extensive dredging where the cuts are long. The aim of this research is to investigate the structure of bottom relief formed under various conditions in a 50-meter hydraulic flume. A comparative analysis of dune parameters showed that the relative height of dunes within the cut is half that of dunes observed in the same areas prior to dredging. Simultaneously, second-order waves were located beneath the dunes, with third-order waves below them. The heights of these waves were similar to those of the dunes. Based on these findings, it is concluded that the design of dredging operations should account for the impact of dunes and waves in the channel relief, which can lead to a reduction in navigable depth. However, it should also be noted that the size of dunes and waves within the dredged cut will be smaller compared to those formed under natural conditions.

Keywords: bedforms, dredged cut, dredging operations, hierarchy of bedforms, dune height, navigable depth loss.

For citation:
Zavarzin Ruslan. V. and V. M. Katolikov "Experimental study of the structure of the bottom relief in the conditions of a dredging cut." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 33–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48.

УДК 556.537

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА В УСЛОВИЯХ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОЙ ПРОРЕЗИ

Р. В. Заварзин, В. М. Католиков

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

Темой работы является анализ строения грядового дна, образующегося в условиях дноуглубительных судоходных прорезей. Отмечается, что многочисленные наблюдения за трансформацией дна прорези свидетельствуют о том, что сразу после выемки грунта на дне прорези начинают формироваться гряды, при этом высотные отметки гребней гряд превышают отметки проектного дна прорези. Сделан вывод о том, что формирование грядового рельефа дна приводит к потере глубины судового хода. Подчеркивается, что наблюдения за структурой рельефа русел равнинных судоходных рек показывают, что донный рельеф состоит из гряд и расположенных под ними волн, высоты которых близки к высотам гряд и, таким образом, их формирование приводит к дополнительной потере гарантированной глубины в прорези. Отмечается, что в наиболее критичном виде такие потери могут наблюдаться на участках капитального дноуглубления, когда прорезь имеет большую длину. Целью работы является исследование структуры донного рельефа, сформированного в различных условиях в 50-метровом гидравликом лотке. Выполненный сравнительный анализ параметров гряд показал, что гряды в прорези по своей относительной высоте в 2 раза меньше гряд, наблюдавшихся на этих же участках до дноуглубления, при этом под грядами располагались волны II, а еще ниже — III уровня (высоты этих волн близки к высотам гряд). На основе результатов выполненной работы сделан вывод о том, что при проектировании дноуглубительных работ следует учитывать, что гряды и волны руслового рельефа будут приводить к потере гарантированной глубины судового хода, однако в пределах прорези их размеры будут меньше, чем при формировании в естественных условиях.

Ключевые слова: донные гряды, судоходные прорези, дноуглубительные работы, иерархия донных форм, высота гряд, потеря гарантированной глубины, трансформация дна прорези, волны руслового рельефа, капитальное дноуглубление, эксплуатационное дноуглубление.

Для цитирования:
Заварзин Р. В. Экспериментальное исследование строения грядового дна в условиях дноуглубительной прорези / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 33–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-33-48. — EDN HPLWPR.

Введение (Introduction)

Устройство дноуглубительных прорезей является эффективным решением, направленным на увеличение гарантированной глубины судового хода в реках [1]. После создания прорези на ее дне образуются гряды, гребни которых формируются на отметках выше проектного дна прорези. Данное обстоятельство приводит к потере гарантированной глубины. Общепринятым является мнение о том, что высота и длина гряд имеет тесную связь с глубиной потока [2], [3] — с увеличением глубины потока должно происходить увеличение высот и длин гряд. В результате обработки большого количества данных, полученных о равнинных реках, в работе [2] было обнаружено, что отношение высоты гряд к глубине потока в среднем составляет 0,11 при $Fr \leq 0,2$ и 0,13 при $0,2 \leq Fr \leq 0,5$, где Fr — число Фруда. Однако наблюдения за рельефом равнинных судоходных рек показывают, что в дноуглубительных прорезях гряды отличаются своими размерами от гряд, формирующихся в стандартных условиях. Так, например, в дноуглубительных прорезях на р. Пур отношение высоты гряд к глубине потока значительно ниже и составляет 0,048–0,084. При этом до выполнения дноуглубительных работ отношение данных параметров составляло 0,10, о чем свидетельствуют данные отчета о НИР по теме «Исследование северных рек в районе газонефтедобычи для разработок рекомендаций по улучшению судоходных условий» (СПб., 1983. 250 с.) и публикации [4]. Такие значительные расхождения в размерах гряд требуют отдельного исследования.

Согласно подходу, разрабатываемому в рамках гидроморфологической теории руслового процесса, донные гряды (микроформы) являются одной из дискретных форм транспорта донных наносов [5]. Уровнем выше *микроформ* находятся *мезоформы* (побочни, осередки, ленточные гряды), соизмеримые с шириной русла. Наивысший уровень — это *макроформы*, к которым относятся целые участки русла и поймы рек. Из практики производства дноуглубительных работ известно, что мезоформы и макроформы в прорезях формироваться не могут в силу размеров прорезей. Однако, как показало исследование [6], при транспорте донных наносов в виде микроформ формируется волновая форма поверхности раздела, которая также приводит к потере гарантированной глубины. В процессе исследования было выявлено, что находящиеся под грядами волны II уровня имеют высоту, которая на 15–30 % меньше высоты гряд, и длину в 3–4 раза больше длины гряд. Впервые данные формы были обнаружены в исследованиях [7] и [8].

Системы длинных судоходных прорезей, которые могут создаваться на протяжении многокилометровых участков рек, называются *капитальными*. Так, например, на 45-километровом участке р. Волги от Городца до Н. Новгорода одним из вариантов обеспечения необходимой гарантированной глубины является создание серии капитальных дноуглубительных прорезей [9]. При такой значительной длине прорезей их рельеф будет состоять из гряд и волн II и III уровней. Все эти русловые формы будут ограничивать допустимую гарантированную глубину судового хода. Таким образом, появляется необходимость исследования иерархической структуры рельефа дна в условиях капитальной дноуглубительной прорези. В таких специфических условиях волны по своим размерам могут отличаться от волн, образующихся в естественных условиях. Это приводит к необходимости исследования иерархии донных форм, формирующихся в прорези, а также уточнения их размеров. Именно с этой целью были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в настоящей работе.

Задачи данного исследования:

1. Выполнить анализ существующих работ, направленных на исследование руслового рельефа в дноуглубительных прорезях.

2. В рамках экспериментальной работы в гидравлическом лотке исследовать строения донного рельефа, образующегося в различных исходных условиях:

– ровное песчаное дно;

– грядовое дно, сформированное в ходе предыдущего эксперимента, с капитальной прорезью, созданной по всей длине рабочего участка лотка;

– гладкий песчаный рельеф дна, состоящий из двух побочней и переката;

– грядовый рельеф дна с побочнями, сформированный в ходе предыдущего эксперимента, с эксплуатационной прорезью в районе переката.

3. Выполнить сравнительный анализ размеров гряд и волн руслового рельефа, образующихся в различных условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ существующих работ, направленных на исследование руслового рельефа в дноуглубительных прорезях. Детально процесс образования гряд в прорезях был исследован в диссертационной работе Б. Ф. Снищенко «Исследование процесса заносимости судоходных прорезей на реках» (Л., 1964. 144 с.). Наблюдения, выполненные на перекатах таких рек, как Волга и Дон, показали, что через шесть дней после создания прорези гряды на ее дне достигают размеров гряд, наблюдавшихся при естественном строении русла. Затем они продолжают расти, становясь в итоге в два раза выше по сравнению с грядами, наблюдавшимися в бытовых условиях. Параллельно с ростом гряд происходит занесение прорези наносами, однако даже спустя два месяца объем наносов, пришедший с соседних участков, повышает отметки прорези на величину, два раза меньшую, чем повышение, вызванное образованием гряд. Исходя из приведенных наблюдений, в указанной ранее диссертационной работе Б. Ф. Снищенко был сделан следующий вывод: «*Главным процессом, определяющим потерю глубины в прорези, является формирование и развитие на ее дне песчаных гряд*» (Л., 1964. С. 113).

Аналогичные наблюдения за донным рельефом в судоходных прорезях были проведены Г. Л. Гладковым и его коллегами на р. Пур [4], и в НИР по теме «Исследование северных рек в районе газонефтедобычи для разработок рекомендаций по улучшению судоходных условий» (СПб., 1983. 250 с.) Глубина прорезей составила 1 м при общей глубине потока 2,0–4,5 м, отношение ширины прорезей к ширине русла составило в среднем 0,35. Первые измерения рельефа дна производились в бытовом состоянии. Повторные измерения проводились через девять дней после окончания дноуглубительных работ, а затем в течение всего лета с интервалом 5–14 дней. На основе полученных данных были построены графики изменения параметров гряд от глубин потока (рис. 1).

Следует отметить, что после создания прорези гряды на ее дне начали уменьшаться по высоте и длине. Спустя девять дней после создания прорези в траншеях *4–5* при увеличении глубины потока с 3,5 м до 4,5 м, высота гряд уменьшилась с 0,36 м до 0,25 м, длина — с 12,5 м до 10,2 м. Далее в течение 12 дней высота и длина гряд продолжали уменьшаться. Затем в течение оставшихся полутора месяцев наблюдений оставались стабильными по своим размерам и имели среднюю высоту 0,14–0,17 м и среднюю длину 6,6–8,3 м. В этот временной промежуток отношение высоты гряд к глубине потока находилось в диапазоне от 0,048 до 0,084. Далее в работе отношение высоты гряд к глубине потока называется *относительной высотой гряды*.

Некоторое увеличение высот и длин гряд началось лишь спустя 2 месяца после создания прорези, когда ее высотные отметки повысились вследствие занесения. Как отмечается в работе [4], во всем диапазоне изменения уровней воды гряды, расположенные за кромкой прорези (при меньшей глубине), оказались крупнее гряд, расположенных в прорези. На основе ранее изложенного можно сделать вывод о том, что в дноуглубительной прорези формируются гряды меньшего

размера как по сравнению с грядами, находящимися в бытовом состоянии на этом участке, так и с грядами на соседних с прорезью участках.

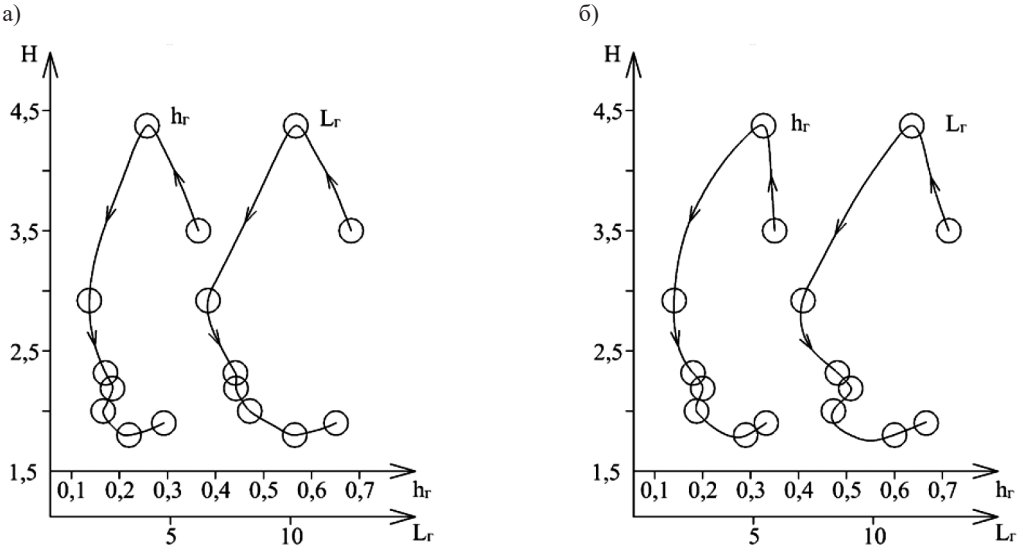

Рис. 1. Изменение высот и длин гряд в зависимости от глубины потока:
а — траншеи *4–5*; *б* — траншеи *6–7*
($h_г$ — высота гряд, м; $L_г$ — длина гряд, м;
стрелками на графике обозначена последовательность измерений)

Другими российскими учеными были проведены различные исследования, направленные на изучение процесса потери гарантированной глубины в прорезях. Данные работы были основаны на наблюдениях на реальных реках [10] и использовании экспериментальных установок [11], а также на применении математического моделирования [12]. Кроме этого, были проведены экспериментальные исследования в Русловой гидравлической лаборатории ГГИ [13], где на ровном грядовом дне осуществлялась выемка грунта в виде карьера, который конструктивно схож с судоходной прорезью, и выполнялись наблюдения за трансформацией дна карьера. Во всех этих исследованиях [10]–[13] подробно не раскрывается тема размеров гряд, внимание акцентируется на процессах заносимости прорези наносами и повышения отметок дна.

Для детального исследования строения грядового рельефа дна в дноуглубительной прорези в процессе работы были проведены экспериментальные исследования в гидравлическом лотке длиной 50 м. Исследование состоит из проведения четырех экспериментов при различных условиях, в частности моделируются условия капитальной дноуглубительной прорези, а также эксплуатационной прорези на участке переката.

Методика проведения экспериментов. Экспериментальные исследования проводились в русловой гидравлической лаборатории ГГИ по методике, разрабатываемой и многократно апробированной в отделе русловых процессов ГГИ [14]. Важнейшим условием проведения экспериментов является соблюдение условия динамического равновесия. Согласно данной 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 объема наносов, подаваемых в поток, и наносов, выносимых за пределы рабочего участка лотка, а также неизменность параметров русловых форм во времени и по длине рабочего участка лотка [14].

Эксперименты проводились в 50-метровом гидравлическом лотке с металлическим дном и стеклянными стенками (ширина лотка 2,0 м, высота стенок 0,7 м, дно горизонтальное, максимальный расход воды 47 л/с). Подача воды в лоток осуществлялась из мерных баков с треугольным водосливом с тонкой стенкой. Для успокоения воды, поступающей из баков, применялись металлические сетчатые ящики, заполненные путаной полиэтиленовой нитью. Регулирование глуби-

ны и уровней воды в лотке производилось с помощью концевого водосливного затвора. Общий вид 50-метрового гидравлического лотка приведен на рис. 2.

а) б)

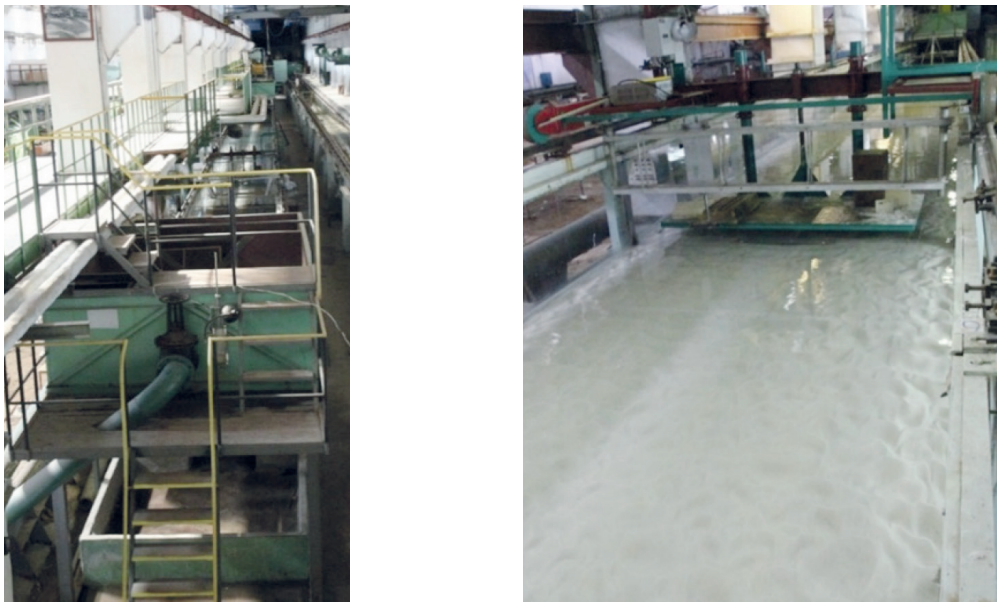

Рис. 2. Вид 50-метрового гидравлического лотка со стороны бака с водосливом (*а*) и вид тележки с измерительным оборудованием (*б*)

Для измерения грядового дна и скоростей потока были использованы измерители Vectrino, основанные на использовании доплеровского способа измерения скоростей и расстояния. Данные инструменты хорошо подходят для использования в лабораторных условиях, а также имеют высокую точность измерения скорости [15].

В ходе подготовительных этапов экспериментов осуществлялось формирование гряд по всему рабочему участку лотка. На начальном этапе в лоток подавался необходимый расход воды, в конце лотка с помощью задвижки выставлялся необходимый уровень воды. По прошествии нескольких часов гряды образуются по всему рабочему участку лотка, затем их размеры стабилизируются. Уклоны свободной поверхности также стабилизируются и таким образом поток достигает состояния динамического равновесия. Для обеспечения баланса наносов в лотке на протяжении всех экспериментов в начало рабочего участка лотка подавались донные наносы в объеме, равном объему выноса наносов в конце рабочего участка.

Методика обработки продольников и измерений параметров донных гряд. Для выделения гряд и расположенных под ними волн различных уровней применяется метод последовательной интерполяции. Такой метод выделения форм руслового рельефа применялся при обработке данных рельефа р. Волга в работе [7]. Также данный метод хорошо себя зарекомендовал в работе по данной теме [6]. В настоящей работе этот метод применяется с некоторыми особенностями: при выделении волн I уровня фильтровались малые выступы руслового рельефа, имеющие высоту менее 0,2 см. Таким образом, волны I уровня, исходя из своих размеров (высоте и длине), являются грядами.

Результаты (Results)

Всего было проведено четыре эксперимента в 50-метровом гидравлическом лотке при различном исходном строении песчаного дна лотка (табл. 1). Расход воды был одинаковым во всех экспериментах и составил 47,0 л/с. В качестве донного материала использовался песок средней крупности 0,29 мм. В условиях экспериментов обеспечивалось движение всех фракций донных наносов.

Таблица 1

Условия экспериментов в 50-метровом лотке

Номер эксперимента	Q, л/с	$H_{пот}$, см	$V_{ср}$, см/с	Fr	Начальные условия	t, мин
1	47,0	8,0 — средняя по участку	33,6	0,41	Ровное песчаное дно, выполненное с уклоном 1 ‰	1 200
2	47,0	8,0 — вне прорези, **15,5** — в прорези	19,5 **27,1**	0,22 **0,22**	Грядовое песчаное дно, сформированное в ходе эксперимента 1. Прорезь по оси русла с шириной 40 см и глубиной выемки 7,5 см	600
3	47,0	8,0 — средняя по участку	27,7	0,31	Гладкое песчаное дно, состоящее из побочней	840
4	47,0	8,0 — средняя по участку, **13,0** — в прорези	24,5 **24,4**	0,28 **0,22**	Грядовое песчаное дно с побочнями, сформированное в эксперименте 3. Прорезь выполнена на перекате, ширина прорези 50 см, глубина выемки 2–4 см	1 800

Эксперимент № 1 — грядовое дно, сформированное на ровной песчаной поверхности. Исходным строением дна являлась ровная песчаная поверхность, уложенная с уклоном 1 ‰. Длина рабочего участка лотка, покрытого песком, составляла 16 м. В гидравлический лоток подавался расход воды, и при заданной глубине потока на дне формировались гряды. После завершения подготовительного этапа эксперимента № 1 по всей длине рабочего участка лотка сформировались трехмерные гряды. Уклоны свободной поверхности стабилизировались и стали равными 1 ‰.

Для измерения рельефа осуществлялось эхолотирование по центральному продольнику. Длина продольника составляла 10 м. Обработка полученного рельефа выполнялась методом последовательной интерполяции. В результате удалось выделить волны трех уровней (рис. 3).

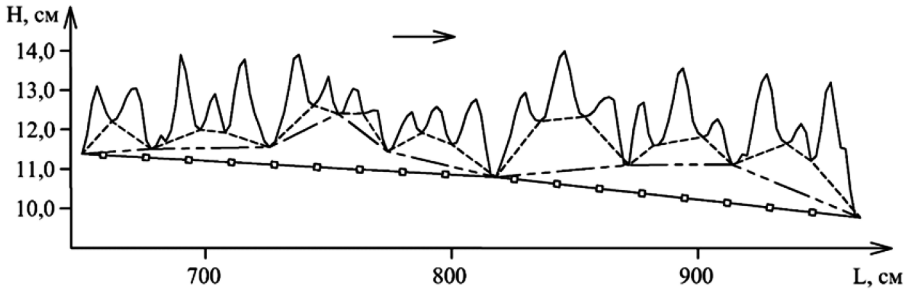

Рис. 3. Грядовый рельеф дна с выделенными волнами (эксперимент № 1):
—— — поверхность гряд; — — — поверхность волн II уровня;
- - - - — поверхность волн III уровня

Параметры русловых форм приведены в табл. 2. При глубине потока 8 см высота и длина гряд составила в среднем 1,10 см и 13,04 см соответственно. Относительная высота гряд равна 0,14. Волны II уровня имеют высоту 0,96 см и длину 40,91 см, в среднем они оказываются длиннее гряд в 3,14 раза. Волны III уровня имеют высоту 0,72 см и длину 143,45 см. Следует отметить, что при увеличении уровня волн их высота уменьшается в среднем на несколько десятков процентов, а длина волн увеличивается в 3–4 раза.

Таблица 2

Характеристики гряд и волн (эксперименты № 1 и 2)

Уровень русловых форм	Характеристики	Эксперимент 1 (Q = 47 л/с)	Эксперимент 2 (Q = 47 л/с)
		H = 8,0 см	Прорезь H = 15,5 см
I (гряды)	Число волн	152	250
	Средняя длина гряд, см	13,04	11,90
	Средняя высота гряд, см	1,10	1,02
	Относительная высота гряд	0,14	0,07
II (волны)	Число волн	46	83
	Средняя длина волн, см	40,91	35,11
	Средняя высота волн, см	0,96	0,87
III (волны)	Число волн	11	24
	Средняя длина волн, см	143,45	94,25
	Средняя высота волн, см	0,72	0,60

Таким образом, были получены параметры русловых форм, сформированных в исходных условиях ровного песчаного дна. Целью следующего эксперимента является выявление особенностей донного рельефа, формирующегося в условиях капитальной дноуглубительной прорези, которая создается на грядовом рельефе дна первого эксперимента.

Эксперимент № 2 — капитальная прорезь по всей длине рабочего участка. Для создания дноуглубительной прорези по всей длине рабочего участка по оси лотка осуществлялась выемка песка. Ширина выемки по дну составляла 40 см, глубина — 7,5 см, откосы имели угол естественного откоса. Уклон дна соответствовал уклону песчаного дна соседних участков — 1 ‰.

После 10 часов проведения эксперимента гряды сформировались по всей длине прорези, а их параметры стабилизировались. Схема лотка со сформировавшимся грядовым дном в прорези представлена на рис. 4. Следует заметить, что гряды в прорези имеют двумерную плановую форму, гребни гряд перпендикулярны потоку и перемещаются вниз по течению равномерно по всей ширине прорези. Транспорт наносов осуществляется лишь в границах прорези, на соседних участках гряды не деформируются и не перемещаются. Таким образом, рельеф дна на соседних участках остался неизменным с первого эксперимента.

а) б)

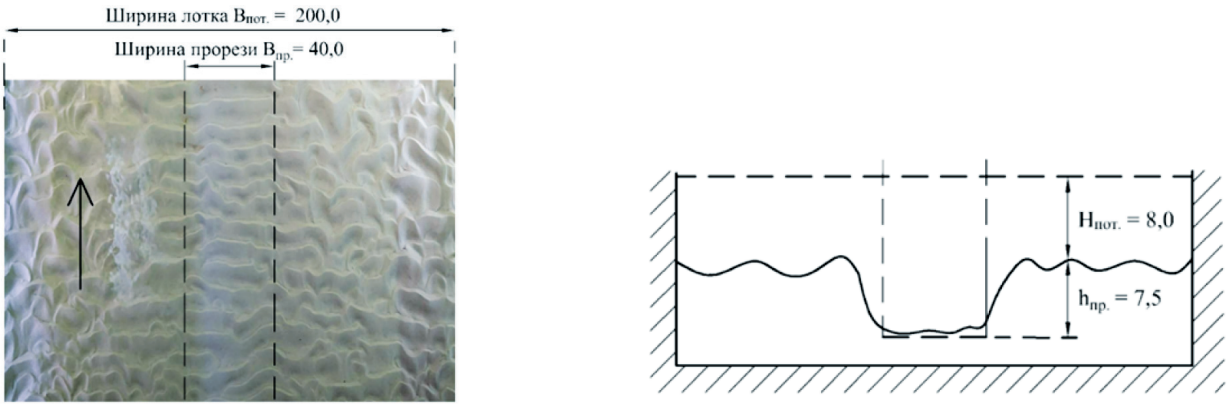

Рис. 4. Вид сверху на грядовый рельеф дна (*а*) и поперечный разрез схемы лотка (*б*) (эксперимент № 2): ——— — рельеф дна (показан схематически); — — — уровень водной поверхности; ⫽⫽⫽ — жесткие границы лотка

Измерение скоростей течения проводилось в точках на глубине 0,6H над гребнями гряд, где *H* — глубина потока. Наибольшие скорости течения, которые наблюдаются в границах прорези, равны 27,1 см/с. На соседних участках скорости составляют 18,5 см/с (у ПБ) и 20,4 (у ЛБ). Таким образом, после создания прорези скорости течения в границах прорези уменьшились с 33,6 см/с до 27,1 см/с.

Эхолотирование и последующая обработка продольников проводились аналогично эксперименту № 1. Часть одного из измеренных продольников представлена на рис. 5. Видно, что грядовый рельеф прорези имеет аналогичную эксперименту № 1 иерархическую структуру, состоящую из гряд и расположенными под ними волн. Параметры гряд и волн представлены в табл. 2. Средняя высота гряд составила 1,02 см, средняя длина 11,90 см. Следует заметить, что абсолютные размеры гряд уменьшились незначительно — всего на 7 %, тогда как относительные размеры уменьшились более чем в 2 раза — с 0,14 до 0,07. Зависимости между разными уровнями волн, наблюдавшиеся в первом эксперименте, сохраняются. При увеличении уровня волн их высота уменьшается на несколько десятков процентов, а длина увеличивается в 3–4 раза.

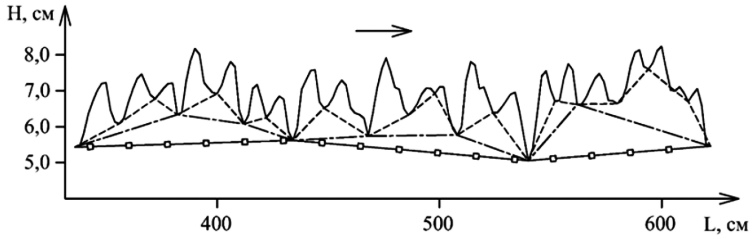

Рис. 5. Грядовый рельеф дна в прорези с выделенными волнами (эксперимент № 2):
——— — поверхность грядд; — — — поверхность волн II уровня; - - - - — поверхность волн III уровня

В результате анализа донного рельефа в процессе проведения первых двух экспериментов были обнаружены существенные различия в относительных размерах гряд и волн в капитальной прорези по сравнению с грядами и волнами, наблюдавшимися ранее в условиях ровного дна. Целью экспериментов № 3 и 4 являлось исследование особенностей рельефа дна, формирующегося в эксплуатационной прорези на перекате.

Эксперимент № 3 — грядовое дно, сформированное на побочнях. Исходное гладкое песчаное дно в данном эксперименте состояло из двух побочней и переката. Эта поверхность строилась на основе материалов эксперимента № 1, проведенного в рамках диссертационной работы [16]. На начальном этапе эксперимента в лоток подавался необходимый расход воды и затем постепенно по всей длине рабочего участка лотка формировались гряды. По происшествии 14 часов проведения эксперимента гряды наблюдались по всей длине рабочего участка, а режим течения приблизился к режиму, наблюдавшемуся работе [18].

Измерение рельефа дна проводилось по всей длине рабочего участка, по ширине лотка продольники измерялись через каждые 5 см. На рис. 6 показан план части измеренного донного рельефа, где находятся гребни двух побочней и район переката. Все размеры на плане даны в сантиметрах, высотные отметки отсчитываются от дна лотка. Гребни побочней выделены серым цветом.

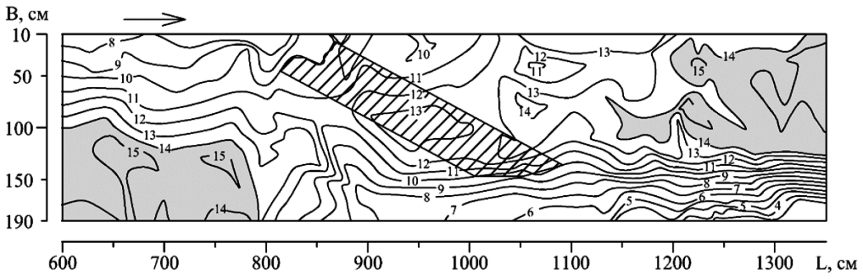

Рис. 6. План рельефа лотка с обозначенным участком создания прорези (эксперимент № 3):
B — расстояние от левого борта лотка (ЛБ); *L* — расстояние от начала рабочего участка лотка;
▨ — границы прорези

Между продольными отметками 800 м и 1200 см и поперечными отметками 60 м и 140 см расположена область переката. Пример грядового рельефа дна, сформированного в данной области, приведен на рис. 7 (бытовое состояние). На каждом измеренном продольнике в данном районе было выделено в среднем по 10–15 гряд, средние высоты гряд приведены в табл. 3.

Таблица 3

Высота гряд в районе проведения дноуглубительных работ

Момент измерения	Характеристики	Расстояние от ЛБ, см								
		60	70	80	90	100	110	120	130	140
До дноуглубления (эксперимент № 3)	$h_г$, см	1,41	1,32	1,06	1,06	0,95	1,07	1,06	0,89	1,03
	H, см	9,59	8,19	7,72	8,20	7,80	8,17	8,03	9,08	10,88
	$h_г$/H	0,15	0,16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,10	0,10
Через 10 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	$h_г$, см	1,22	1,32	1,24	0,81	0,64	0,73	0,73	0,81	0,71
	H, см	8,45	8,47	8,74	10,44	10,98	11,32	12,43	12,58	12,78
	$h_г$/H	0,15	0,17	0,15	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
Через 20 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	$h_г$, см	1,06	0,96	1,65	1,06	1,13	0,90	0,93	0,81	0,96
	H, см	8,75	8,19	9,38	9,94	9,83	10,62	11,86	12,57	12,55
	$h_г$/H	0,12	0,12	0,18	0,11	0,12	0,09	0,08	0,06	0,08
Через 30 часов после дноуглубления (эксперимент № 4)	$h_г$, см	1,17	1,41	1,14	1,12	0,87	0,64	0,72	1,31	0,69
	H, см	10,94	10,45	9,63	9,34	9,77	10,45	11,86	12,37	12,98
	$h_г$/H	0,11	0,14	0,12	0,12	0,09	0,06	0,06	0,11	0,05

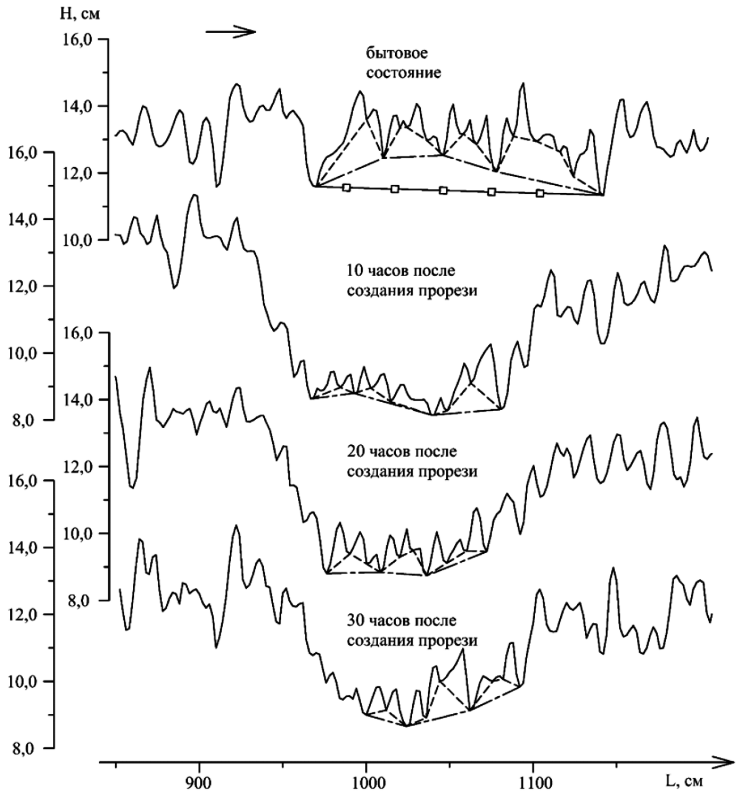

Рис. 7. Грядовый рельеф дна в прорези на расстоянии 120 см от ЛБ в бытовом состоянии, а также спустя 10, 20 и 30 ч после создания эксплуатационной прорези (эксперимент № 4):
—— — поверхность гряд; — — — поверхность волн II уровня, ---- — поверхность волн III уровня

Следует заметить, что гряды имеют высоты в диапазоне 0,89–1,41 см. Заметна тенденция уменьшения высот гряд при отдалении от левого края лотка к правому, что объясняется различным положением продольников относительно частей побочней и, соответственно, различными параметрами потока. Относительные размеры гряд также уменьшаются от левого края к правому от 0,15 до 0,10.

Иерархическое строение рельефа дна аналогично строению, рассматриваемому в предыдущих экспериментах. В рамках данной работы детальному анализу подвергался только район переката. Как видно на рис. 7, под грядами формируются волны донного рельефа II и III уровней. Визуальный анализ показывает, что волны II уровня, как правило, больше гряд по длине в 3–4 раза, тогда как их высоты близки друг к другу, что совпадает с выводами предыдущего эксперимента.

Эксперимент № 4 — эксплуатационная прорезь, созданная на перекате. Целью данного эксперимента является исследование параметров гряд, образующихся на дне прорези. Для этого на перекате была произведена срезка донного слоя толщиной в среднем 2–4 см до высотной отметки 9,5 см. Расположение полученной прорези приведено на рис. 6. После 10 часов проведения эксперимента по всей длине прорези сформировались гряды.

Ввиду неравномерно перемещения донных наносов по ширине лотка верхний участок прорези на продольниках 60, 70 и 80 почти полностью подвергся занесению за 10 часов. Нижняя часть прорези начиная с продольника 90 осталась свободной. На рис. 7 показаны измерения продольника, расположенного на расстоянии 120 см от ЛБ спустя 10, 20 и 30 ч после создания прорези. За временные интервалы между измерениями средние высотные отметки прорези повышаются незначительно, в среднем на 0,3 см. Фиксируется перемещение вышерасположенного откоса прорези в среднем на 7–8 см каждые 10 ч.

Анализируя характер грядового рельефа дна прорези и соседних участков (рис. 8), можно обнаружить, что бо́льшая часть гряд имеет трехмерную форму. Однако в районе нижней части прорези рельеф состоит из двумерных гряд, гребни которых отмечены на фотографии. Кроме того, гряды на данном участке прорези повернуты под углом к направлению течения. В правой части лотка (за границами прорези) гря́ды также направлены вправо. Из этого следует, что для корректного измерения размеров волн руслового рельефа необходимы измерения, выполненные параллельно кромкам прорези. Имеющееся в распоряжении лабораторное оборудование не позволяет выполнять такие измерения. Поэтому по выполненным измерениям рельефа корректно оценить длину гряд и волн руслового рельефа невозможно. Сделано допущение, что измерение высоты гряд на таких продольниках не повлечет ошибки в значениях средней высоты гряд.

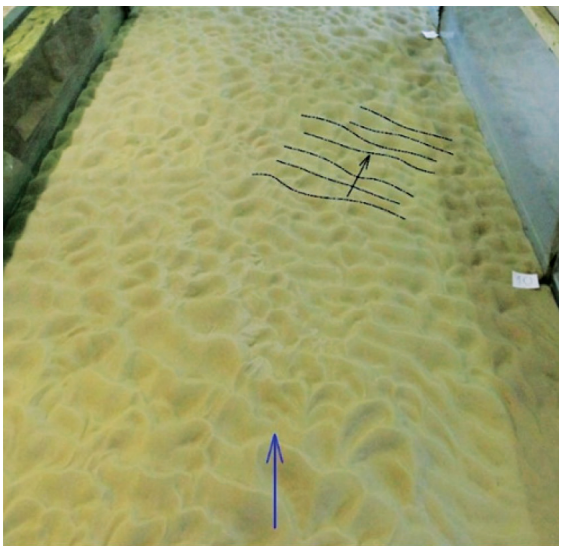

Рис. 8. Грядовый рельеф дна прорези
между продольными отметками 800 и 1200
от начала рабочего участка (эксперимент № 4)

Под грядами на продольниках (см. рис. 7) виден волнообразный характер рельефа. Однако для корректного выделения иерархии гряд в прорези выполненные измерения не подходят по ранее указанным причинам. Детально были проанализированы только гряды, расположенные в границах прорези. В среднем на каждом продольнике удалось выделить по 5–10 гряд в прорези. Средние высоты гряд приведены в табл. 3. Следует заметить, что спустя 10 часов отметки дна верхней части прорези на продольниках 60, 70 и 80 повысились. Средняя высота гряд спустя 10 часов достигла значений 1,26 см, относительная высота — 0,16 см, тогда как в бытовом состоянии эти параметры составили 1,26 см и 0,15 см соответственно. Через 20 и 30 часов средние параметры гряд в этом районе не претерпели заметных изменений.

Гряды в нижней части (продольники от 90 до 140) прорези через 10 часов проведения эксперимента имеют среднюю высоту 0,74 см и относительную высоту 0,06 см. Через 20 ч был занесен участок прорези, зафиксированный на продольниках 90 и 100. Как следствие, гряды в этом районе начали расти и достигли высоты, близкой в высоте в бытовом состоянии. В свободной части прорези через 20 часов гряды по своим размерам остаются стабильными, средняя абсолютная высота равна 0,96 см, относительная высота — 0,08 см. Через 30 часов значительных изменений в параметрах гряд не произошло, исключением является продольник 130, где высоты гряд увеличились до 1,31 см. Объясняется это, скорее, ошибкой, причиной которой является малая выборка гряд, так как на соседних продольниках высоты гряды не увеличились.

Обсуждение (Discussion)

В настоящее время как в отечественных, так и зарубежных научных школах ученые сходятся во мнении, что донный рельеф является копией структуры турбулентного потока [5], [14], [17]. Наглядной иллюстрацией этого является связь между параметрами микроформ речного дна и макротурбулентностью руслового потока. Зависимость между параметрами гряд и потока была обнаружена и подтверждена многочисленными исследованиями, проведенными как в лабораторных [18], [19], так и в натурных условиях [17]. В результате обработки большого количества данных рельефа равнинных судоходных рек было обнаружено, что отношение высоты гряд к глубине потока (относительная высота гряд) в условиях малых равнинных рек равно 0,13 (при числе Фруда $0{,}2 \leq Fr \leq 0{,}5$) [2], [19]. Отношение длины гряды к глубине потока в среднем находится в диапазоне от 2 до 10 [2].

Результаты эксперимента № 1 показали, что относительная высота гряд в начальных условиях ровного песчаного дна составляет в среднем 0,14. Отношение средней длины гряд к глубине потока составляет 1,86. Гряды, сформировавшиеся в данном эксперименте, по своим относительным размерам близки к ранее найденным зависимостям между глубиной потока и параметрами гряд. Совершенно другие размеры имеют гряды, сформировавшиеся на дне капитальной прорези в эксперименте № 2: средняя относительная высота гряд равна 0,07, относительная длина — 0,77. Следует заметить, что относительные размеры сформировавшихся в прорези гряд почти в 2 раза меньше привычного диапазона данных значений, который известен из работ [2], [20].

Иерархия донных форм как на дне прорези, так и в условиях отсутствия прорези состоит из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. При увеличении уровня волн их длины увеличиваются в 3–4 раза, а высота уменьшается на 10–30 %. Аналогичные наблюдения были сделаны в рамках более ранней работы авторов по данной теме [5]. Необходимо отметить, что вслед за изменением размеров гряд происходит изменение размеров волн и зависимости между размерами гряд и волн на дне прорези сохраняются.

В ходе эксперимента № 3 осуществлялось формирование грядового рельефа на побочневой форме дна. Было обнаружено, что гряды, расположенные в районе переката, имеют абсолютные высоты 0,89–1,41 см и относительные — 0,10–0,16. Такие размеры гряд хорошо соответствуют ранее выявленным зависимостям между параметрами гряд и потока.

Эксперимент № 4 заключался в создании эксплуатационной прорези в районе переката. Наблюдения показали, что верхняя часть прорези была занесена наносами в первые 10 часов, а нижняя оставалась свободной на протяжении всего периода наблюдений. Гряды в верхней части прорези по своим высотам сравнялись с грядами в этом же районе до начала проведения работ. Иная картина наблюдалась в нижней части прорези, которая не подверглась занесению. Абсолютная высота гряд в этом районе находилась в диапазоне от 0,64 до 0,81 см, а относительная — от 0,06 до 0,08. Аналогичная ситуация наблюдалась через 20 и 30 часов — гряды в свободной незанесенной части прорези оставались с высотой, заметно меньшей, чем имели гряды до создания прорези. Средние относительные высоты гряд через 20 часов составляют 0,08, через 30 часов — 0,07, тогда как в бытовом состоянии на этих продольниках средняя относительная высота составила 0,12.

Сравнивая полученные результаты с результатами диссертационной работы Б. Ф. Снищенко «Исследование процесса заносимости судоходных прорезей на реках» (Л., 1964. 18 с.), можно обнаружить некоторые несоответствия. Так, согласно сделанным в этой работе выводам, в прорези происходит довольно быстрый рост гряд и их размеры в конечном итоге превышают размеры гряд, наблюдающихся на этом же участке до выполнения дноуглубления, тогда как результаты экспериментов, выполненных в настоящей работе, свидетельствуют о противоположном — гряды в прорези сохраняют свои малые размеры до момента начала активного занесения, затем происходит их рост, достигая размеров, наблюдающихся до создания прорези. Наблюдения, выполненные Г. Л. Гладковым в р. Пур [4], наоборот, соответствуют результатам, полученным в настоящей работе. Относительные высоты гряд на дне прорезей на р. Пур составили 0,048–0,084. При этом увеличение размеров этих гряд происходило по мере занесения прорези. Такие результаты наблюдений полностью совпадают с результатами, полученными в настоящем лабораторном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Дноуглубительная прорезь своей формой меняет гидравлическую структуру потока. Как следствие, грядовый рельеф, являющийся отражением структуры турбулентного потока, также изменяется. Исходя из анализа рельефа дна, полученного в ходе экспериментов, было выявлено, что после создания прорези гряды, сформировавшиеся на ее дне, отличаются по размерам и плановой форме от гряд, наблюдающихся на этом же участке до создания прорези.

Результаты экспериментов № 1 и 2 показали, что гряды на дне капитальной прорези имеют меньшие абсолютные размеры, чем гряды, сформированные ранее при рельефе дна без прорези. Разница в абсолютной высоте и длине не так значительна (составляет всего 7 % и 9 %). Однако относительные размеры гряд различаются в 2 раза. Отношение высоты гряд к глубине потока в прорези (относительная высота гряд) равно 0,07, тогда как до создания прорези это отношение составляло 0,14. Отношение длины гряд к глубине потока также уменьшилось примерно в 2 раза: с 1,63 до 0,76. В обоих экспериментах рельеф дна состоял из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. Под грядами расположены волны II уровня, которые имеют длины, в 3–4 раза превышающие длины гряд, а их высоты меньше гряд на 10–30 %. Ниже формируются волны III уровня, их длины в 3–4 раза больше вышерасположенных волн, а высоты меньше на 10–30 %. Из этого можно сделать вывод о том, что размеры волн II и III ровней зависят в первую очередь от размеров гряд. При уменьшении гряд в условиях прорези волны также уменьшаются.

В работе по исследованию иерархии гряд [6] была выявлена аналогичная иерархическая структура руслового рельефа. Волны II уровня, как в натурных, так и в экспериментальных условиях, были длиннее гряд в 3–4 раза. Однако в условиях реального речного рельефа волнами III уровня могут являться зарождающиеся средние русловые формы либо иные формы, образование которых вызвано влиянием внешних фактором. Таким образом, волны III уровня в натурных условиях могут не соответствовать полученным в ходе экспериментов зависимостям. Размеры волн III уровня будут соответствовать найденным зависимостям только в том случае, если они будут формироваться в исходных условиях ровного песчаного дна. Все указанные особенности рельефа

дна прорези необходимо учитывать при проектировании дноуглубительных работ. Так, например, при проектировании серии капитальных дноуглубительных прорезей на участке р. Волги от Городца до Н. Новгорода [8] следует учитывать, что при больших длинах прорезей их рельеф будет состоять из гряд и расположенных под ними волн руслового рельефа II и III уровней. Наличие всех указанных форм будет приводить к потере гарантированной глубины.

В результате моделирования условий побочневого рельефа дна с эксплуатационной прорезью в районе переката были сделаны следующие наблюдения. Рельеф дна прорези состоит из двумерных гряд, тогда как за границами прорези гряды трехмерные. В свободной части прорези абсолютные высоты гряд 10–20 % меньше, чем высоты гряды, которые были на этом же участке до создания прорези. Относительные высоты гряд в прорези составляют в среднем 0,06, тогда как до создания прорези этот показатель был в 2 раза больше и равен 0,12. Необходимо отметить, что гряды в верхней занесенной части прорези имеют такие же размеры, как и гряды на этом же участке до создания прорези, тогда как на границе между верхней и нижней частью прорези происходит постепенное занесение, и высоты гряд растут, т. е. по мере занесения прорези и повышения отметок дна гряды восстанавливают свою высоту.

На основе проведенных наблюдений можно сделать вывод о том, что в случае создания эксплуатационной прорези в районе переката следует ожидать, что размеры гряд в границах прорези будут отличаться в меньшую сторону по сравнению с ранее наблюдавшимися грядами на бытовом дне. Рельеф в прорези будет иметь волновые формы, расположенные под грядами. Эти особенности грядового рельефа необходимо учитывать при определении потери гарантированной глубины в прорези.

Для понимания причин нестандартных зависимостей между параметрами гряд и потока в условиях прорези необходимы детальные исследования скоростного поля потока и турбулентных вихрей. Дальнейшие исследования должны сопровождаться подробными измерениями турбулентной структуры потока.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают признательность коллективу русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института за помощь в проведении исследования. Особую благодарность авторы выражают лаборанту В. А. Черненко, оказавшему помощь в проведении измерений в гидравлическом лотке, а также коллективу кафедры водных путей и водных изысканий ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и в особенности заведующему кафедрой Г. Л. Гладкову за консультации в ходе проведения исследования, а также предоставление результатов наблюдений за рельефом р. Пур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладков Г. Л.* Гидроморфология русел судоходных рек: моногр. / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2019. — 432 с. — EDN WIKSCS.

2. *Петровская О. А.* Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. … канд. техн. наук / Ольга Андреевна Петровская. — СПб.: Государств. гидрологический ин-т, 2018. — С. 252.

3. *Гладков Г. Л.* Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63. — EDN VUSNQA.

4. *Гладков Г. Л.* Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев, Ю. П. Соколов. — СПб., ГУВК, 2005. — EDN QNTIMB.

5. *Католиков В. М.* Проблемы моделирования деформаций речных русел с учетом дискретного характера транспорта руслоформирущих наносов в реках / В. М. Католиков // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической

конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 44–57 — EDN KKZJQC.

6. *Заварзин Р. В.* Учет иерархии русловых форм при выполнении дноуглубительных работ в руслах судоходных рек / Р. В. Заварзин, В. М. Католиков // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: сборник тезисов докладов VII Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 22 мая 2024 года. — Москва: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2024. — С. 122–123. — EDN DZVXHF.

7. *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. 31. DOI: 10.7868/S0321059615010137. — EDN TCJCEN.

8. *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.

9. *Гладков Г. Л.* Гидроморфологический режим и судоходные условия в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла: проблема и пути решения / Г. Л. Гладков, К. П. Моргунов, П. А. Гарибин, М. А. Колосов // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 4(95). — С. 24–30. — EDN RDPPUJ.

10. *Воронина Ю. Е.* Методические подходы оценки заносимости перекатов нижнего бьефа Нижегородской ГЭС и их влияние на обеспечение судоходных глубин участка / Ю. Е. Воронина // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 198–207. DOI: 10.37890/jwt.vi72.294. — EDN JLDMAQ.

11. *Калашников А. А.* Проектные решения при устройстве дноуглубительных прорезей / А. А. Калашников // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306. — EDN QIRXLU.

12. *Беликов В. В.* Математическая модель транспорта наносов для расчета заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров / В. В. Беликов, Н. М. Борисова, Г. Л. Гладков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — Т. 2. — С. 105–113. — EDN KCPIQX.

13. *Гладков Г. Л.* Обеспечение устойчивости русел судоходных рек при дноуглублении и разработке русловых карьеров: автореф. дис. … техн. наук; специальность: 05.22.17 «Водные пути сообщения и гидрография» / Геннадий Леонидович Гладков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — EDN ZJNNDL.

14. *Клавен А. Б.* Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса: монография / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-история, 2011. — 504 с. — EDN QKKGJD.

15. *Liu D.* The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user's perspective / D. Liu, K. Alobaidi, M. Valyrakis // Acta Geophysica. — 2022. — Vol. 70. — Is. 5. — Pp. 2297–2310.

16. *Католиков В. М.* Экспериментальные исследования побочневого типа руслового процесса: дис. … канд. техн. наук; специальность: 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология» / Виктор Михайлович Католиков. — СПб., Гос. гидролог. институт, 2000. — 24 с. — EDN QDGADV.

17. Best J. The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions / J. Best // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. — 2005. — Vol. 110. — Is. F4. DOI: 10.1029/2004JF000218.

18. *Gyr A.* Bed forms in turbulent channel flow / A. Gyr, W. Kinzelbach // Applied Mechanics Reviews. — 2004. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 77–93. DOI: 10.1115/1.1584063.

19. *Best J.* Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field / J. Best // Fluvial Sedimentology VII — John Wiley & Sons, Ltd, 2005. — С. 41–60. DOI: 10.1002/9781444304350.ch3.

20. *Костюченко А. А.* Особенности процесса и стока донных наносов малых рек / А. А. Костюченко, З. Д. Копалиани // VI Всероссийский гидрологический съезд. Секция 6, 2006. — С. 44–49.

REFERENCES

1. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek*: *Monografiya*. 2nd edition. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

2. Petrovskaya O. A. Optimizatsiya metodov rascheta raskhoda donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskikh parametrov rek. PhD diss. SPb.: Gosudarstv. Gidrologicheskiy in-t, 2018.

3. Gladkov, Gennadii L. and P. V. Beljakov. "Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.

4. Gladkov, G. L., M. V. Zhuravlev and Yu. P. Sokolov *Environmental impact assessment of engineering activities on navigable rivers.* Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education St. Petersburg State University of Water Communications. St. Petersburg: A. Kardakov Publishing House, 2005.

5. Katolikov, V. M. "Problems of modeling deformations of river channels in the light of discrete character of transport of bedload in rivers." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 29–31 maya 2023 goda.* Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023: 44–57.

6. Zavarzin, R. V. and V. M. Katolikov. "Uchet ierarkhii ruslovykh form pri vypolnenii dnouglubitel'nykh rabot v ruslakh sudokhodnykh rek." *Sovremennye problemy gidravliki i gidrotekhnicheskogo stroitel'stva: Cbornik tezisov dokladov VII Vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo seminara, Moskva, 22 maya 2024 goda.* Moskva: Izdatel'stvo: MISI–MGSU, 2024: 122–123.

7. Sidorchuk, A. Yu. "Otsenka stoka vlekomykh nanosov v rechnom rusle s uchetom dannykh ob aktivnoy i passivnoy dinamike gryad." *Vodnye resursy* 42.1 (2015): 31. DOI: 10.7868/S0321059615010137.

8. Alekseevskiy, N. I. and A. Yu. Sidorchuk. "Morphology and dynamics of active bed forms in the Terek R. Channel." *Vodnye resursy* 44.2 (2017): 147–157. DOI: 10.7868/S0321059617010035.

9. Gladkov, G. L., K. P. Morgunov, P. A. Garibin and M. A. Kolosov. "Hydro-morphological regime and navigability in the after bay of the Nizhnii Novgorod waterpower development: problem and solutions." *Transport Rossiyskoy Federatsii 4(95) (2021): 24–30.*

10. Voronina, Yu. E. "Methodological approaches to assessing the siltation of rifts in the downstream section of the Nizhny Novgorod HPP and their impact on ensuring navigable depths of the site". *Russian journal of water transport* 72 (2022): 198–207. DOI: 10.37890/jwt.vi72.294.

11. Kalashnikov, A. A. "Design solution for the dredging slots production." *Russian journal of water transport* 72 (2022): 208–215. DOI: 10.37890/jwt.vi72.306.

12. Belikov, V. V., N. M. Borisova and G. L. Gladkov. "Matematicheskaya model' transporta nanosov dlya rascheta zanosimosti dnouglubitel'nykh prorezey i ruslovykh kar'erov." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 2 (2010): 105–113.

13. Gladkov, G. L. Obespechenie ustoychivosti rusel sudokhodnykh rek pri dnouglublenii i razrabotke ruslovykh kar'erov. Grand PhD diss. Sankt-Peterburg, 1996.

14. Klaven, A. B., Z. D. Kopaliani; A. B. Klaven and Z. D. Kopaliani. *Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes.* Sankt-Peterburg: Obschestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Nestor-Istoriya", 2011: 504.

15. Liu, D., K. Alobaidi and M. Valyrakis. "The assessment of an acoustic Doppler velocimetry profiler from a user's perspective." *Acta Geophysica* 70.5 (2022): 2297–2310.

16. Katolikov, V. M. Eksperimental'nye issledovaniya pobochnevogo tipa ruslovogo protsessa. PhD diss. Sankt-Peterburg, 2000.

17. Best, J. "The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110.F4 (2005). DOI: 10.1029/2004JF000218.

18. Gyr, A. and W. Kinzelbach. "Bed forms in turbulent channel flow ." *Applied Mechanics Reviews* 57.1 (2004): 77–93. DOI: 10.1115/1.1584063.

19. Best, J. "Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field." *Fluvial Sedimentology VII*John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 41–60. DOI: 10.1002/9781444304350.ch3.

20. Kostyuchenko, A. A. and Z. D. Kopaliani "Features of the process and flow of bottom sediments in small rivers." *Reports of the VI All-Russian Hydrological Congress. — Section 6. — Problems of channel processes, erosion and sedimentation,* 2006: 44–49.

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*

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*

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

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 09 января 2025 г.
Received: Jan. 9, 2025.