

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63

SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS: DEPENDENCE OF THE DUNES PARAMETERS ON THE DETERMINING FACTORS

G. L. Gladkov, P. V. Belyakov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issue of improving the model of the transport of channel sediments in rivers is considered in the paper. To date, in practice, a large number of different formulas are used to calculate the discharge of bottom sediments in rivers. However, the reliability of channel forecasts carried out using the apparatus of mathematical modeling remains rather low. The quality of the results obtained during the creation and verification of numerical models of the discharge of channel sediments in rivers depends to a large extent on the reliability of the used field data. The traditional methods for measuring sediment discharge with bottom bathometers, which were previously used during observations at hydrometeorological stations and posts of Roshydromet, have a rather large error. It is necessary to improve the used database, focusing on other methods of measurement. Such work has been carried out in recent years by the State Hydrological Institute. This direction of research, based on the use of the methodology for calculating the discharge of channel sediments using the parameters of dunes, can objectively lead to increasing the quality of forecasts of channel transformations on rivers. For this purpose, it is necessary to study the dependence of the dunes parameters and the speed of their movement on the main determining factors. The dependences of the dunes parameters — the height, the length and the movement speed of the dunes, obtained in this work using the apparatus of multivariate regression analysis, as well as the formula for the bottom sediments discharge from the determining factors of the river flow, are tested on the basis of field and laboratory measurements materials. The new results make it possible to improve the quality and reliability of modeling sediment transport in natural channel flows and can be recommended for use in computational practice.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, sediment discharge, dunes parameters, Froude number, Shezy coefficient, channel transformations.

For citation:

Gladkov, Gennadii L. and Pachom 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.

УДК 556.536

ТРАНСПОРТ НАНОСОВ В РЕКАХ: ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ГРЯД ОТ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Г. Л. Гладков, П. В. Беляков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проблема, исследуемая в рамках настоящей работы, посвящена совершенствованию модели транспорта русловых наносов в реках. Отмечается, что к настоящему времени на практике используется большое количество различных формул, предназначенных для вычисления расхода донных наносов в реках, однако надежность русловых прогнозов, выполняемых с использованием аппарата математического моделирования, по-прежнему остается достаточно низкой. Качество результатов, полученных при создании и верификации численных моделей расхода русловых наносов в реках, в значительной степени зависит от надежности используемых натурных данных. Подчеркивается, что традиционные способы измерения расхода наносов донными батометрами, применяемыми ранее при проведении наблюдений

на гидрометеорологических станциях и постах Росгидромета, имеют достаточно большую погрешность. Обращается внимание на то, что необходимо развивать используемую базу данных, ориентируясь на другие, более точные способы измерений. Такая работа в течение длительного времени проводилась Государственным гидрологическим институтом. Отмечается, что данное направление исследований, основанное на использовании методики расчета расхода русловых наносов с использованием параметров донных гряд, может объективно привести к повышению качества прогнозов русловых переформирований на реках. С этой целью необходимо исследовать зависимости параметров донных гряд и скорости их перемещения от основных определяющих факторов. Полученные в настоящей работе с использованием аппарата многомерного регрессионного анализа зависимости параметров донных гряд: высоты гряды, длины гряды и скорости перемещения донных гряд, а также формула расхода донных наносов от определяющих факторов речного потока, были протестированы на основе материалов натурных и лабораторных измерений. Отмечается, что новые результаты дают возможность повысить качество и надежность моделирования транспорта наносов в естественных русловых потоках и могут быть рекомендованы для использования в расчетной практике.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези, русловые переформирования.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Одной из наиболее сложных задач в практике расчетного обеспечения судоходных условий на реках с подвижными донными отложениями до настоящего времени является прогнозирование русловых переформирований (деформаций дна) в реках. Такие прогнозы представляют практический интерес при эксплуатации объектов инфраструктуры внутренних водных путей, обеспечении устойчивости судовых ходов на свободных реках и в нижних бьефах гидроузлов, а также при проектировании и эксплуатации выправительных сооружений в руслах судоходных рек и причальных сооружений на водных путях и др.

Традиционные методы исследований в области руслового процесса [1]–[5] основаны на использовании геоморфологического подхода, а также на использовании результатов гидравлических и гидроморфологических исследований. Для моделирования русловых переформирований в отечественной и зарубежной практике широко используется аппарат математического моделирования [6], [7]. Гидравлические расчеты характеристик движения воды и переформирований дна в реках выполняются путем решения системы уравнений Сен-Венана с использованием численных методов. Указанная система включает уравнение неустановившегося неравномерного движения воды в реке, а также уравнения неразрывности и деформаций. Система уравнений замыкается заданием двух дополнительных функций: формулы коэффициента Шези и формулы расхода наносов при заданных начальных и граничных условиях, характеризующих гидравлико-морфометрические и гидрологические данные.

Основные рекомендации для построения алгоритма гидравлических расчетов, полученные по результатам выполненных исследований в работах авторов [8]–[11], заключаются в следующем. При вычислении отметок свободной поверхности в реках с крупнозернистыми донными отложениями величину потерь энергии по длине рекомендуется определять по расчетным формулам типа Маннинга — Штриклера [12] и А. П. Зегжды [13]. В ходе расчетов необходимо уточнить по натурным данным значение свободного члена в исходной зависимости коэффициента Шези и эффективную высоту выступов шероховатости на дне речного потока, что позволит учесть дополнительные факторы сопротивления движению воды в реке.

В реках с мелкозернистыми грунтами донных отложений основная доля сопротивления движению воды обусловлена наличием донных гряд в русле реки. Параметры гряд и скоростное

поле потока изменяются с изменением расхода воды в реке, а также в результате проведения русловых инженерных мероприятий. В этом случае в расчетах рекомендуется использовать формулы гидравлического сопротивления по длине [9], [10], полученные на основе установленной связи коэффициента Шези от скорости течения воды. Структура этих формул позволяет учесть механизм обратной связи в системе *речной поток — подвижное русло*. При расчете русловых деформаций в реках целесообразно использовать расчетные зависимости коэффициента Шези, полученные для оценки зернистой шероховатости донных отложений, либо построенные по материалам натурных исследований зависимости, устанавливающие связь относительной доли зернистой шероховатости дна от полной величины потерь энергии по длине по аналогии с результатами Дж. Гриффитса [14].

Выполненные исследования [9] показали, что при наличии измеренных уклонов свободной поверхности на исследуемом участке реки из всех рассмотренных вариантов тестовых расчетов наилучшие, в сопоставлении с данными измерений расхода влекомых наносов, дает модифицированная формула Л. ван Рейна. Значение свободного члена в этой формуле получилось равным 0,0014 при использовании методики Эйнштейна — Ялина для оценки грядовой составляющей коэффициента Шези и методики Ашида — Егiazарова — Зенгена [15] для пофракционного вычисления расхода разнотернистых наносов.

Результаты вычислений, выполненных на основе расчетных формул для оценки зернистой шероховатости дна с помощью формул Маннинга — Штриклера и А. П. Зегжды показывают [10], что применение данных формул для определения величины коэффициента подвижности в формуле расхода влекомых наносов может быть рекомендовано при отсутствии измерений уклона свободной поверхности. При использовании формулы Л. ван Рейна в качестве модели транспорта наносов в данном случае величина свободного члена получилась равной 0,001. При этом формула Маннинга — Штриклера может использоваться в авторской трактовке, а в формуле А. П. Зегжды величину свободного члена следует принять равной 1,0.

Тестирование формул расхода наносов в данных работах было выполнено на основании выборки исходных данных измерений на реках, подготовленной по материалам Государственного водного кадастра. Вместе с тем следует признать, что используемая ранее на гидрологической сети методика измерения расхода наносов донными батометрами имеет существенную погрешность. Однако необходимо отметить, что расчетные модели получились достаточно сложными для использования в расчетной практике, что побуждает к поиску новых решений.

В рамках настоящего исследования исходная выборка была расширена за счет привлечения данных Государственного гидрологического института об измеренных расходах наносов по элементам движения донных гряд в реках и гидравлических лотках, приведенных в работе [16]. Методы измерений, использованные при создании выборки, отличаются высокой надежностью и рекомендованы для применения на практике действующими наставлениями Росгидромета.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общепринятое выражение для вычисления расхода влекомых наносов по элементам движения донных гряд было получено для случая *квазиустановившегося движения воды* [8], когда статистические характеристики донного рельефа не зависят от времени. Если донные гряды не перестроиваются при своем движении, то расход наносов меняется по их длине в соответствии с изменением высоты профиля гряды. В реальных условиях элементы движения потока обладают значительной изменчивостью, а параметры донных волн, в свою очередь, имеют высокий коэффициент вариации. Тем не менее, данный способ измерения расхода наносов обладает более высокой надежностью по сравнению с традиционными способами измерений донными батометрами.

Формула для вычисления среднего расхода наносов q_s , переносимого одной грядой, записывается в виде

$$q_s = (1 - \varepsilon) C_r \frac{\omega_r}{l_r} = (1 - \varepsilon) \sigma C_r h_r, \quad (1)$$

где ω_r — площадь продольного сечения гряды; l_r — длина гряды; h_r — высота гряды; $\sigma = \omega_r / l_r h_r$ — коэффициент полноты профиля гряды; ε — коэффициент пористости донных отложений; C_r — скорость перемещения гряды.

Параметры гряд и скорость их перемещения определяют на практике путем *эхолотирования по продольным галсам*. Для учета имеющейся вариации параметров гряд в реальных условиях, в процессе измерений полученные значения осредняют по длине промерного профиля, охватывая промером 20–30 гряд по длине потока. Коэффициент полноты профиля гряды может изменяться в пределах 0,5–0,75, поэтому его значение также определяется в ходе обработки результатов выполненных промеров. При всей очевидной простоте формулы расхода наносов (1) основные затруднения для ее использования на практике заключаются в отсутствии надежной информации о параметрах гряд.

Выполненные экспериментальные и натурные исследования на реках показали, что размеры гряд существенно изменяются с изменением расхода и уровня воды в реке. При этом с увеличением глубины потока длина и высота гряд растут в размерах, достигая максимальных значений к моменту наступления пика половодья, а затем уменьшаются на спаде уровней воды. В отдельных случаях при больших скоростях течения воды на перекатах может происходить смыв гряд, при этом их длина стремится к бесконечности, а высота — к нулю.

Детальные исследования грядового движения наносов в реках были проведены Государственным гидрологическим институтом. В работе [17] выполнены анализ и систематизация материалов собственных исследований характеристик движения гряд в реках и в гидравлических лотках, а также данных других авторов, на основании которых были построены парные связи размеров гряд от определяющих факторов. Наиболее тесная связь высоты донных гряд прослеживается с глубиной потока. Данная зависимость оказалась нелинейной. При глубинах потока примерно до 1,0 м (по Б. Ф. Снисенко, 1982), т. е. в области, охватывающей материалы измерений в гидравлических лотках и малых водотоках, связь высоты гряд с глубиной потока оказалась сильнее. С увеличением глубины воды в реке эта связь становится слабее, т. е. на крупных реках относительная высота гряд оказывается меньше, чем на малых реках и в лабораторных исследованиях. В случае неустановившегося движения воды однозначность этой связи нарушается, особенно на спаде уровней воды, когда донные гряды не успевают перестраиваться вслед за меняющимся расходом воды в реке. К. В. Гришанин [8] отмечает наличие петли гистерезиса на графике связи высоты гряд с глубиной речного потока. Как показали проведенные ранее исследования, размеры гряд слабо зависят от крупности слагающих их частиц.

При разработке дноуглубительной прорези на перекате, в результате работы земснаряда, в полосе прорези донные гряды срабатываются полностью. Однако непосредственно после окончания работы снаряда высота донных гряд начинает быстро расти и через непродолжительное время грядовой рельеф в прорези восстанавливает свои размеры. Причем в начальный период времени этот процесс протекает более интенсивно, а с течением времени затухает. Изменяются также и параметры гряд за кромками дноуглубительной прорези. Еще более сложная картина трансформации грядового рельефа наблюдается при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов. Учитывая столь значимую динамику изменения размеров донных гряд с изменением гидравлических характеристик потока и большую вариацию их значений в процессе переформирования, получить надежную расчетную зависимость для высоты гряд с последующим вычислением расхода наносов в реках оказалось затруднительно.

В работе [18] автор выполнила тестирование семнадцати различных формул ряда отечественных и зарубежных авторов для определения высоты донных гряд. Анализ полученных результатов показал, что погрешность вычисления высоты гряд по всем анализируемым расчетным формулам оказалась достаточно высокой. При этом наиболее надежными для практики вычислений остаются эмпирические расчетные зависимости, полученные ранее в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) [17] на основе установления связи высоты гряд от глубины потока. Надежное прогнозирование значений высоты донных гряд в реках оказывается важным

не только для вычисления величины расхода наносов в реке, но и для прогнозирования изменения глубин на перекатах судоходных рек.

Другим важным параметром, характеризующим транспорт наносов в виде донных гряд в реках, является их длина. В явном виде эта величина в формулу расхода наносов (1) не входит, однако указанный параметр — длину гряд — необходимо уметь надежно прогнозировать исходя из следующих соображений. Отношение высоты гряды к ее длине h_r / l_r характеризует безразмерную высоту (крутизну) гряд.

Исследования, выполненные в гидравлических лотках с песчаными грядами, дали много информации для изучения физической картины этого процесса. По результатам этих исследований В. С. Кнорозом были получены расчетные зависимости для вычисления высоты и длины гряд, а также расчетная зависимость для определения потерь энергии по длине в потоке с грядовым дном.

В гидравлических лотках значение коэффициента Шези, отвечающее грядовому сопротивлению дна, оказалось обратно пропорциональным крутизне и относительной высоте гряд: $C_r / \sqrt{g} = f(l_r / h_r, R / h_r)$. В естественных русловых потоках с грядовым дном величина сопротивления движению воды оказалась больше, чем дает экспериментальная зависимость В. С. Кнороза. Позднее в работах [8], [9], [17] было установлено, что определяющим фактором при оценке грядового сопротивления движению воды является длина гряд, а точнее, шаг расположения водоворотных зон за гребнями гряд. Расчетная зависимость К. В. Гришанина — Б. Ф. Снисченко записывается в виде

$$C_r / \sqrt{g} = (l_r / H)^{3/2}. \quad (2)$$

С увеличением расхода и уровней воды в реке длина гряд возрастает, что приводит к уменьшению величины потерь энергии по длине потока. На спаде уровней воды наблюдается обратная картина. Как показали данные натурных наблюдений [17] за трансформацией донных гряд при неустановившемся движении воды, скорость изменения высот гряд с меняющимся расходом воды в реке оказывается больше, чем скорость изменения их длин. Это приводит к тому, что с ростом уровней воды крутизна гряд в потоке возрастает, а на спаде, наоборот, уменьшается. При смыве донных гряд в половодье крутизна гряд стремится к нулю. И, наконец, третьим параметром, характеризующим величину расхода наносов в реке, является скорость перемещения донных гряд.

Изучению этого вопроса в указанных ранее работах ГГИ было посвящено большое количество экспериментальных и натурных исследований. В результате выполненных работ Б. Ф. Снисченко и З. Д. Копалиани (1978) была получена расчетная формула для определения скорости перемещения донных гряд в реках:

$$C_r = 0,019V(V / \sqrt{gH})^{2,9}, \quad (3)$$

при получении которой авторы использовали многочисленные данные измерений, выполненных в гидравлических лотках, равнинных и горных реках с различной крупностью донных отложений. Корреляция полученной связи оказалась достаточно высокой, что позволяет использовать ее в расчетах до настоящего времени. Таким образом, из всех параметров, входящих в формулу расхода наносов по элементам движения донных гряд, наименее надежно прогнозируется высота гряды в связи с большой вариацией их значений в реках.

В настоящей работе с привлечением новых натурных и экспериментальных данных исследовалась возможность совершенствования используемых подходов к решению задачи транспорта наносов в реках. На момент проведения исследования общая выборка содержит данные 211 измерений на равнинных реках, а также в гидравлических лотках и на размываемых моделях — 220 измерений. В работе [16] измерения на реках были подразделены на две категории в зависимости от величины числа Фруда. К первой категории отнесены крупные реки с числом Фруда $Fr < 0,2$ уклонами $0,000069 \leq I \leq 0,000195$ глубинами $2,90 \leq H \leq 13,7$ м и средним размером донных отложений $0,3 \leq d \leq 2,9$ мм. Эта группа содержит данные измерений параметров грядового рельефа на реках Дон, Иртыш, Днепр, Кама, Белая, Вычегда и Волга. Ко второй категории отнесены реки

с $0,2 \leq Fr \leq 0,5$, $0,000270 \leq I \leq 0,001660$, $0,20 \leq H \leq 5,40$ м и $0,26 \leq d \leq 7,5$ мм. Измерения проводились на реках Ануй, Лосиха, Тогул, Полометь, Хиш.

В состав выборки исходных данных включены эксперименты в лотках З. Д. Копалиани, В. Ф. Пушкарева, Г. П. Уильямса, Х. П. Гая, Д. Б. Саймонса и И. В. Ричардсона и на размываемых моделях рек Ньюжи, Хара-Мурин, Утулик и Аносовки. Общий объем исходных данных, включающий измерения на равнинных реках, в гидравлических лотках и на размываемых моделях, составил 431 измерение. Наиболее полно в составе выборки представлены сведения об измеренных значениях высоты донных гряд. Эти данные содержатся во всех измерениях. Сведений о скорости перемещения донных гряд немного меньше, общее их количество составляет 415 измерений.

В состав выборки данных включены результаты 278 измерений значений длин донных гряд. Диапазоны изменения гидравлических условий в использованных данных измерений на реках, гидравлических моделях и в лотках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны изменения гидравлических характеристик потока и параметров гряд

Характеристика	Равнинные реки	Гидравлические модели и лотки
Глубина потока H , м	0,20/10,0	0,020/ 0,338
Уклон водной поверхности I , ‰	0,069/1,660	0,4/10,1
Скорость потока V , м/с	0,58/1,70	0,35/1,45
Крупность донных отложений d , мм	0,23/4,00	0,6/6,5
Высота гряд h_r , м	0,01/1,25	0,005/0,104
Длина гряд l_r , м	0,80/21,0	0,18/ 2,71
Скорость перемещения гряд c_r , м/с	0,000011/0,00169	0,00015/ 0,031
Число Фруда $V / \sqrt{gh}$	0,09/0,50	0,34/1,05
H / d	144/25556	9/364

При выполнении последующего анализа параметров транспорта наносов от определяющих факторов использовался общий массив измерений.

Результаты (Results)

На основе имеющейся выборки исходных данных было выполнено тестирование параметров донных гряд: высоты, длины и скорости перемещения гряд, а также рассчитанных по параметрам гряд значений величины расхода влекомых наносов в зависимости от определяющих факторов. В качестве последних использовались скорость течения, глубина потока и число Фруда.

Исследовалась расчетная зависимость вида $\ln Y = A + B(\ln V) + C(\ln H) + D(\ln Fr)$. Результаты многомерного регрессионного анализа приведены в табл. 2, первые восемь расчетных зависимостей в которой были получены для прогнозирования параметров донных гряд: высоты, длины и крутизны гряд. Полученные результаты показывают, что наиболее тесная связь высоты и длины гряд наблюдается с глубиной потока.

Таблица 2

Результаты многомерного анализа параметров донных гряд и расхода наносов в зависимости от определяющих факторов

№ п/п.	Y	A	B	C	D	R_2
1	h_r	-1,813	0,00	0,931	0,00	0,862
2	h_r / H	-1,761	0,527	-0,137	0,00	0,095
3		-1,545	0,00	0,00	0,221	0,077
4	l_r	1,543	0,00	0,977	0,00	0,704

Таблица 2
(Окончание)

5	l_r / H	1,501	-0,713	0,080	0,00	0,063
6		1,535	0,00	0,00	-0,030	0,030
7	h_r / l_r	-3,410	0,00	-0,039	0,00	0,007
8		-3,350	1,157	-0,207	0,00	0,239
9	C_r / V	-7,308	2,697	-1,419	0,00	0,844
10		-4,069	-0,140	0,00	2,837	0,844
11		-4,017	0,00	0,00	2,863	0,843
12	q_s / VH	-10,105	3,204	-1,561	0,00	0,778
13		-6,541	0,082	0,00	3,122	0,778
14		-6,571	0,00	0,00	3,106	0,776

Расчетные зависимости получили следующий вид:

$$h_r / H = 0,16H^{-0,069}; \quad (4)$$

$$l_r / H = 4,68H^{-0,023}. \quad (5)$$

На основании приведенных в табл. 2 данных, связь высоты гряд с глубиной потока оказалась более тесной, чем связь длины гряд с глубиной. Небольшие отрицательные значения показателей степени при глубине потока в правой части формул (4) и (5) свидетельствуют о незначительной нелинейности установленных связей, как отмечалось ранее.

Для исключения размерности свободного члена в уравнениях регрессии полученные выражения легко преобразовать, используя выражение для безразмерной глубины потока в виде $\sqrt[3]{gH^3/\nu^2}$. Принимая среднюю величину коэффициента кинематической вязкости, равную $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре воды +15 °С, получим следующие расчетные формулы для вычисления средних значений высоты и длины донных гряд в речном потоке:

$$h_r / H = 0,32 \left(H^3 \sqrt[3]{g/\nu^2} \right)^{-0,069}; \quad (6)$$

$$l_r / H = 5,9 \left(H^3 \sqrt[3]{g/\nu^2} \right)^{-0,023}. \quad (7)$$

Зависимости (6) и (7) хорошо согласуются с расчетными формулами, полученными ранее в Государственном гидрологическом институте [17]. Так, при глубине потока, равной 1,0 м, средняя высота гряд получается равной 0,16 м, а средняя длина гряд — 4,68 м. В качестве нового аргумента высоты гряд в этих формулах установлена слабая прямая связь высоты и длины донных гряд с вязкостью воды. Этот вопрос до настоящего времени специально не изучался. Однако из опыта эксплуатации водных путей известно, что в летний период времени наблюдаются более высокая интенсивность переформирования донных гряд, чем в конце навигации. Из этого следует, что в зимний период времени в реках можно ожидать появления относительно более высоких и более длинных донных гряд, чем летом, при одинаковых кинематических характеристиках речного потока.

Дополнительный учет скорости течения в формулах для высоты и длины гряд (см. данные табл. 2) показал отсутствие такой связи между анализируемыми параметрами. Отсутствует связь между безразмерными значениями высоты гряд с числом Фруда (см. данные табл. 2). Ранее такую возможность постулировал К. В. Гришанин [8], [17] на основании анализа теории начальной устойчивости подвижного дна (по Дж. Кеннеди, 1963). Однако на данном этапе работы это предложение пока не получило экспериментального подтверждения.

Возможность существования связи между безразмерной длиной гряд и числом Фруда обосновывается результатами ранее выполненных исследований. Так, приведенная расчетная формула (2) показывает, что безразмерная высота гряд (по К. В. Гришанину — Б. Ф. Снищенко) пропорциональна

коэффициенту Шези в степени $2/3$. Если принять, согласно [10], существование зависимости коэффициента Шези от числа Фруда в виде $C / \sqrt{g} \sim (V / \sqrt{gH})^{3/4}$, то отсюда следует, что безразмерная длина гряд в речных потоках должна быть пропорциональной корню квадратному от числа Фруда. Однако проведенные на данном этапе исследования наличие такой связи не подтвердили (см. данные табл. 2), что свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований.

Результаты выполненного анализа зависимости крутизны донных гряд от определяющих факторов (см. данные табл. 2), показали, что таких связей нет. По аналогии с установленной ранее зависимостью Б. Ф. Снисченко — З. Д. Копалиани (3) для анализа скорости движения гряд в работе были исследованы зависимости скорости перемещения гряд от кинематических характеристик речного потока: скорости течения воды, глубины потока и числа Фруда (см. данные табл. 2).

Полученные результаты показывают, что такие связи имеют достаточно высокую корреляцию. При этом наиболее предпочтительной представляется зависимость безразмерной скорости движения гряд от числа Фруда. В результате выполнения регрессионного анализа была построена расчетная зависимость между анализируемыми параметрами в виде $\ln(C_r / V) = f(\ln(V / \sqrt{gH}))$. Анализ расчетной зависимости показывает, что связь между скоростью перемещения донных гряд и числом Фруда оказалась достаточно тесной с коэффициентом корреляции $R_2 = 0,84$. С учетом установленных значений величины свободного члена и углового коэффициента в уравнении регрессии она записывается в виде

$$C_r / V = 0,018(V / \sqrt{gH})^{2,86}. \quad (8)$$

Очевидно, что данная связь достаточно хорошо согласуется с полученной ранее формулой Б. Ф. Снисченко — З. Д. Копалиани (1978 г.).

График сопоставления измеренных и рассчитанных значений безразмерной скорости перемещения донных гряд по формуле (8) показан на рис. 1. В дальнейших построениях будем использовать исходную расчетную зависимость для скорости гряд (3), полученную Б. Ф. Снисченко — З. Д. Копалиани (1978). Подставив это соотношение в формулу расхода наносов (1), получим

$$q_s = (0,019(1 - \varepsilon)\sigma) h_r V Fr^{2,9}. \quad (9)$$

В этой формуле высоту гряд можно определять на основании полученной ранее зависимости (6).

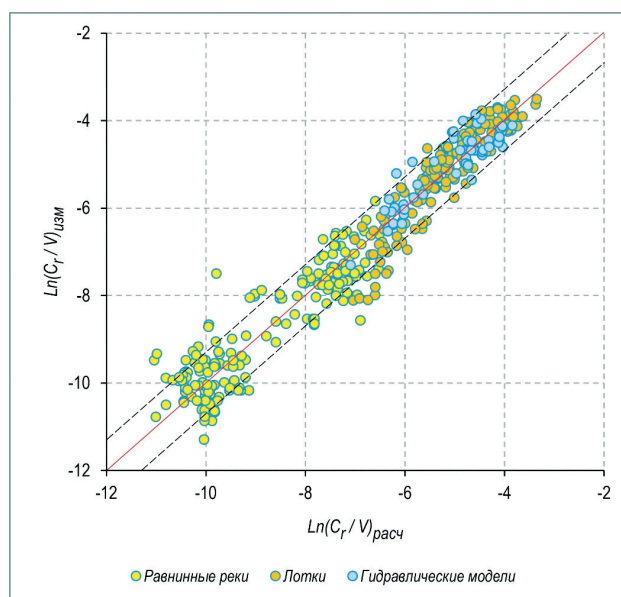


Рис. 1. График сопоставления измеренных и рассчитанных данных по формуле (8)

С учетом полученного результата следующим этапом исследования явилась попытка построения связи расхода влекомых наносов в зависимости от анализируемых определяющих факторов.

В ходе выполнения регрессионного анализа (см. данные табл. 2) исследовалась расчетная зависимость между анализируемыми параметрами в виде $\ln(q_s / HV) = f((\ln(V / \sqrt{gH}), \ln(V / \sqrt[3]{gv}), \ln(\sqrt[3]{gH^3 / v^2}))$.

Расход наносов вычислялся в формуле (1) по измеренным элементам движения донных гряд как произведение высоты гряды на скорость ее перемещения. Значения коэффициента полноты формы гряды и коэффициента пористости грунта в данных вычислениях принимались равными их средним значениям: $\sigma = \omega_r / l_r h_r = 0,6$ и $\varepsilon = 0,4$.

Полученные результаты показывают, что такие связи имеют достаточно высокую корреляцию. При этом наиболее предпочтительной представляется зависимость безразмерной скорости движения гряд от числа Фруда. В результате выполнения регрессионного анализа была построена расчетная зависимость между анализируемыми параметрами в виде

$$q_s / HV = 0,0014(V / \sqrt{gH})^{3,11} \quad (10)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что связь между расходом донных наносов и числом Фруда оказалась достаточно тесной с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,78$. График сопоставления измеренных и рассчитанных значений безразмерного расхода донных наносов по формуле (10) показан на рис. 2.

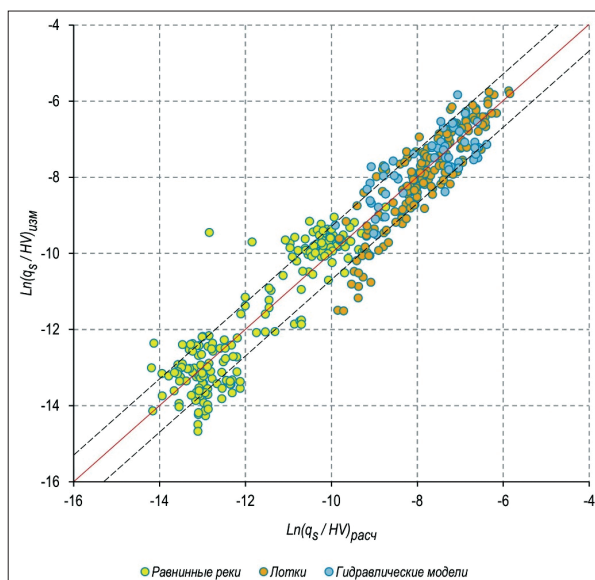


Рис. 2. График сопоставления измеренных и рассчитанных данных по формуле (10)

Общий вид полученной формулы расхода донных наносов (10) и параметры регрессии: угловой коэффициент и свободный член, в достаточной степени согласуются с материалами других независимых исследований [7], что позволяет рекомендовать полученные результаты для использования в практической деятельности.

Обсуждение (Discussion)

Для оценки точности вычислений по полученным формулам для расчета высоты гряд (6), длины гряд (7), скорости перемещения гряд (8) и расхода наносов (10) было выполнено сопоставление измеренных и рассчитанных данных по этим формулам.

По каждой расчетной формуле определялось процентное количество данных в общем объеме выборки, попадающих в диапазон значений $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$. При этом величина Δ вычислялась как частное от деления измеренного значения $F_{изм}$ анализируемых параметров: высоты гряды, длины гряды, скорости перемещения гряды и расхода донных наносов, на рассчитанное значение $F_{расч}$ этой величины.

Кроме того, была выполнена оценка средней величины расхождения рассчитанных и измеренных данных в виде $\Delta_{\text{ср}} = \frac{|F_{\text{расч}} - F_{\text{изм}}|}{F_{\text{изм}}} 100 \%$, что позволило сопоставить относительные значения рассчитанных и измеренных величин анализируемой функции по полученным формулам.

Сопоставление рассчитанных значений параметров донных гряд: высоты, длины и скорости их перемещения, а также вычисленных по элементам движения донных гряд значений расходов влекомых наносов с натурными данными свидетельствует об их удовлетворительном совпадении. Результаты вычислений сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка точности вычислений параметров транспорта донных наносов
в зависимости от определяющих факторов**

Расчетная формула	Оценка точности вычислений, %	
	$0,5 \leq \Delta \leq 2,0 \%$	$\Delta_{\text{ср}} = \frac{ F_{\text{расч}} - F_{\text{изм}} }{F_{\text{изм}}} 100 \%$
$h_r / H = 0,32 \left(H^3 \sqrt{g / v^2} \right)^{-0,069}$	87,24	38,1
$l_r / H = 5,9 \left(H^3 \sqrt{g / v^2} \right)^{-0,023}$	83,45	44,1
$C_r / V = 0,018 (V / \sqrt{gH})^{2,86}$	83,13	46,1
$q_s / HV = 0,0014 (V / \sqrt{gH})^{3,11}$	70,84	62,6

Оценка точности результатов расчетов (см. табл. 3) показала, что погрешность вычислений, превышающая двухкратный диапазон расхождения между измеренными и рассчитанными данными ($0,5 \leq \Delta \leq 2,0$, где $\Delta = F_{\text{изм}} / F_{\text{расч}}$), составляет менее 13 % от общего объема выборки при вычислении значений высоты донных гряд.

Достаточно точно прогнозируются также такие параметры, как длина гряд и скорость их перемещения (с погрешностью менее 17 %), менее точно — расход влекомых наносов (с погрешностью менее 30 %).

Заключение (Conclusion)

Анализ полученных результатов показывает, что основным определяющим фактором для вычисления высоты и длины донных гряд в реках является глубина потока. В свою очередь, скорость перемещения донных гряд и расход наносов в существенной степени зависят от числа Фруда. С точки зрения практического использования полученных результатов наибольший интерес для решения задач, связанных с моделированием параметров транспорта наносов и расчетом русловых переформирований в реках, представляет формула (10) для определения безразмерного расхода донных наносов. Коэффициент корреляции в уравнении регрессии, построенном при установлении связи расхода наносов с числом Фруда, составил 0,776. Величина свободного члена в данной формуле составила $A = 0,0014$, а значение углового коэффициента в уравнении регрессии по результатам тестирования модели оказалась равным $D = 3,106$ (регрессионная зависимость приведена в пп. 14 табл. 2). Новая зависимость для расхода донных наносов по своей структуре хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работах [10], [11]. В этих исследованиях с использованием материалов измерений на реках с различной крупностью донных отложений была получена модифицированная формула Л. ван Рейна (1984). Формула была протестирована по данным 296 измерений на крупных

реках, выполненных в разные годы на гидрологических постах «Росгидромета» с использованием традиционных методов. Полученные в настоящей работе расчетные зависимости для параметров донных гряд: высоты гряды, длины гряды и скорости перемещения донных гряд, а также формула расхода донных наносов с использованием аппарата многомерного регрессионного анализа на основе материалов натурных и лабораторных измерений, могут быть рекомендованы для использования в расчетной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 608 с.
2. Чалов Р. С. Там же. — Т. 2: Морфодинамика речных русел. — М.: КРАСАНД, 2011. — 960 с.
3. Чалов Р. С. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений / Р. С. Чалов, С. Р. Чалов // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47. — № 3. — С. 259–271. DOI: 10.31857/S0321059620030049.
4. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 544 с.
5. 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.
6. Zaitsev A. A. Using computer modelling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river / A. A. Zaitsev, V. V. Belikov, A. N. Militeev // IAHS Proceedings and Reports. — 2004. — Vol. 288. — Pp. 386–394.
7. Belikov V. V. On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers / V. V. Belikov [et al.]. — 2019. — Vol. 46. — Is. 1. — Pp. S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.
8. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
9. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
10. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
11. Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
12. Stricler A. Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauchigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen / A. Stricler // Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft. — 1923. — № 16.
13. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах / А. П. Зегжда. — Л.; М.: Госстройиздат, 1957. — 276 с.
14. Griffiths G. A. Flow resistance in coarse gravel bed rivers / G. A. Griffiths // Journal of the Hydraulics Division. — 1981. — Vol. 107. — Is. 7. — Pp. 899–918.
15. Gladkow G. L. Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen / G. L. Gladkow, B. Söhngen // Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. — Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. — Nr. 82. — Pp. 123–130.
16. Самохвалова О. А. Оптимизация методов расчета донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. ... канд. техн. наук / О. А. Самохвалова. — СПб.: Государств. гидрологический ин-т, 2018. — 252 с.
17. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сنيщенко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
18. Самохвалова О. А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках / О. А. Самохвалова // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–2. — С. 269.

REFERENCES

1. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 1. Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI, 2008.
2. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND, 2011.
3. Chalov, R. S., and S. R. Chalov. "Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding." *Water Resources* 47.3 (2020): 374–386.
4. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Experimental Studies and Hydraulic Modeling of River Flows and Channel Processes*. SPb.: Nestor-Historiy, 2011.
5. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd edition. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.
6. Zaitsev, A. A., V. V. Belikov, and A. N. Militeev. "Using computer modelling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river." *IAHS Proceedings and Reports* 288 (2004): 386–394.
7. Belikov, V. V., N. M. Borisova, T. A. Fedorova, O. A. Petrovskaya, and V. M. Katolikov. "On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers." *Water Resources* 46.1 (2019): S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.
8. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
9. Grishanin, K. V. *Gidravlicheskie soprotivleniya estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
10. Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. "Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
11. Gladkov, Gennadii L. "Studying the granular roughness of river channels bottom." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
12. Stricler, A. "Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Raueigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen." *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft* 16 (1923).
13. Zegzhda, A. P. *Gidravlicheskie poteri na trenie v kanalakh i truboprovodakh*. L., M.: Gosstroizdat, 1957.
14. Griffiths, George A. "Flow resistance in coarse gravel bed rivers." *Journal of the Hydraulics Division* 107.7 (1981): 899–918.
15. Gladkov, G. L., and B. Söhngen. "Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen." *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. 123–130.
16. Petrovskaya, O. A. *Optimizatsiya metodov rascheta donnykh nanosov s uchetom gidravlicheskikh parametrov rek*. PhD diss. SPb.: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut, 2018.
17. Kondrat'ev, N. E., I. V. Popov, and B. F. Snishchenko. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesssa*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
18. Samokhvalova, O. A. "Selective approach for bedload discharge calculations in rivers." *Modern Problems of Science and Education* 1–2 (2015): 269.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладков Геннадий Леонидович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

Беляков Пахом Витальевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: BelyakovPV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gladkov, Gennadii L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

Beljakov, Pachom V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: BelyakovPV@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 01 февраля 2021 г.
Received: February 1, 2021.