

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт»
(ФГБУ «ГГИ»)

На правах рукописи

Петровская Ольга Андреевна

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ С
УЧЕТОМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕК

25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в ФГБУ «Государственный гидрологический институт»

Научный руководитель: Копалиани Зураб Дмитриевич
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник,
ведущий научный сотрудник ФГБУ «ГГИ»

Официальные оппоненты: Гладков Геннадий Леонидович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой водных путей и водных
изысканий ФГБОУ ВО «Государственный
университет морского и речного флота имени
адмирала С.О. Макарова»

Исаев Дмитрий Игоревич
кандидат географических наук, доцент,
заведующий кафедрой гидрометрии ФГБОУ ВО
«Российский государственный
гидрометеорологический университет»

Ведущая организация: АО «Всероссийский научно-исследовательский
институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Защита состоится _____ 2019 г. в _____ на заседании
Диссертационного совета Д.002.040.01 при ФГБУН Институт водных проблем
Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН.
Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим
направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, Институт водных
проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д.002.040.01.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник



Соколовский М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Решение многих водохозяйственных и природоохранных задач требует расчета расхода и стока донных наносов. Точность расчета этих величин существенным образом влияет на безопасность, надежность и стоимость выполняемых мероприятий. Активное развитие математических гидродинамических моделей речного потока и русловых деформаций требует максимально достоверного расчета степени подвижности донных отложений и расхода донных наносов (РДН).

К настоящему времени созданы сотни методов расчета РДН, однако точность расчетов все еще остается очень низкой. Результаты, получаемые по разным методам, отличаются от данных измерений и между собой в десятки и сотни раз. Помимо низкой точности имеют место несоответствия применения методов расчета их назначению. Так для расчетов расхода донных наносов используются методы, предназначенные для общего расхода наносов, а для расчета РДН в равнинных реках используются методы, предназначенные для горных рек.

Такое положение вызвано, во-первых, тем, что большинство авторов не проверяют свои методы на независимых данных измерений. При этом зачастую формулы РДН декларируются и/или воспринимаются, как универсальные. Во-вторых, информация по методам расчета и данным измерений не систематизирована. Обобщения результатов исследований ведутся фрагментарно, без учета всей имеющейся информации и опыта предшественников. Естественным следствием является то, что водохозяйственные и природоохранные задачи до сих пор решаются неудовлетворительно.

Целью настоящих исследований является научно обоснованная оптимизация методов расчета РДН на основе учета гидравлических особенностей водотоков. Данная работа развивает дифференцированный подход к расчетам РДН, разрабатываемый в ГГИ с начала 2000-х гг. Он учитывает специфику гидравлических и гидрологических условий транспорта донных наносов в реках разных размеров, расположенных на равнинных и горно-предгорных территориях, особенности морфологии русла, состава руслового материала и формы движения донных наносов (грядовая или бесструктурная). Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- анализ существующих методов измерения РДН в полевых и лабораторных условиях и выбор наиболее надежных данных измерений;
- классификация собранных данных по гидравлическим признакам применительно к задаче расчета РДН и составление электронной базы данных – основы для дальнейшего исследования;

- анализ и систематизация существующих методов РДН наносов с учетом условий их применения;
- апробация расчетных методик на основе данных достоверных измерений, классифицированных по гидравлическим признакам;
- научное обоснование рекомендуемых методов расчета;
- разработка научно-обоснованных рекомендаций по расчету РДН для каждой из выделенных гидравлических групп водотоков.

Научная новизна

- впервые разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета РДН;
- созданы три специализированные базы данных натуральных и лабораторных измерений РДН, чья достоверность подтверждена критическим анализом;
- получены новые эмпирические формулы: для расчета высоты донных гряд и РДН;
- созданы две базы данных отечественных и зарубежных методов расчета РДН, основанных на различных методических подходах, в том числе из тех, которые ранее в отечественной научной литературе не рассматривались;
- впервые анализ и апробация большого числа расчетных методов выполнены для каждой гидравлической категории рек и на основе обширных, достоверных данных;
- уточнена технология расчета в области выбора критического значения параметра Шильдса и учета неоднородности гранулометрического состава донных наносов;
- впервые разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету РДН для различных видов речных русел и форм движения донных наносов;
- получены локальные зависимости РДН для рек Севера и Северо-Запада в створах Гидрометслужбы при минимальной гидравлической информации.

Теоретическая и практическая значимость

Разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета РДН. В результате анализа и апробации на основе обширных, достоверных данных большого числа расчетных методов дано их научное обоснование. Разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету РДН дифференцированно для равнинных и горно-предгорных рек с учетом их гидравлических особенностей. Уточнена технология расчета в области выбора критического значения параметра Шильдса и учета неоднородности гранулометрического состава. Созданы специализированные базы данных измерений и методов расчета РДН.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертации является гидроморфологическая теория руслового процесса. В ее основе лежит представление о дискретности и иерархичности транспорта наносов. Утверждается, что донные наносы движутся на четырех структурных уровнях: частицы, микроформы-гряды, мезоформы и пойменного массива, – при этом обмена наносами между структурными элементами одного уровня не происходит. В диссертации рассматриваются структурные уровни частицы и микроформы-гряды. Гряда перемещается как целостное морфологическое образование без потери наносов.

В диссертации выполнялись гидравлические и статистические расчеты.

Использованные данные измерений РДН взяты из архива ГГИ и литературных источников, кроме экспериментов по р. Мзымте, проведенных А.С. Чеботаревым специально для настоящего исследования.

Положения, выносимые на защиту

- гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета РДН;
- научно обоснованные рекомендации по расчету РДН для равнинных и горно-предгорных рек с учетом их гидравлических особенностей;
- новые эмпирические формулы: для расчета высоты гряд и РДН;
- результаты уточнения технологии расчета РДН, в т.ч. по выбору критического значения параметра Шильдса и учету неоднородности гранулометрического состава;
- локальные зависимости РДН для рек Севера и Северо-Запада в створах Гидрометслужбы, полученные при минимальной гидравлической информации.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается достоверностью данных измерений РДН, примененных для научного анализа и апробации методов расчета.

Результаты, полученные в данной работе, использованы при выполнении следующих научных тем ФГБУ «ГГИ»:

- «Разработка мероприятий по стабилизации нового канализированного русла р. Мзымта в районе медиа-деревни (пос. Эсто-Садок) на основе лабораторных исследований гидравлических условий прохождения паводков 1%-ной обеспеченности» (2012);
- «Формирование заторов льда в узле слияния рек Сухона-Юг-Малая Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг» (2014);

- «Исследование водного режима и русловых процессов рек Тосна и Луга, разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по снижению вредного воздействия вод и противопаводковой защите» (2014);
- «Исследование водного режима и русловых процессов реки Шелонь, разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по снижению вредного воздействия вод и противопаводковой защите» (2014).

Отдельные части данной работы были доложены на:

- семинарах Отдела русловых процессов ГГИ (2010-2012);
- научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Санкт-Петербург, 2012);
- научной конференции «Contemporary hydrological issues in the research of Polish and Russian MSc and PhD students» (Торунь, Польша, 2012);
- Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2013);
- научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Санкт-Петербург, 2014);
- международной научной конференции «Deltas: genesis, dynamics, modeling and sustainable development» (Истомино, Бурятия, 2014);
- VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2014);
- IV международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, 2014);
- V международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, 2015);
- научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Санкт-Петербург, 2016).

В 2014 и 2016 гг. работа была представлена в форме лекции на курсах повышения квалификации для инженеров-гидрологов.

Личный вклад

Все научные и практические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или в соавторстве с научным руководителем З.Д. Копалиани, кроме вывода локальной зависимости РДН для р. Юг, который выполнен А.С. Самохваловым.

Основное содержание работы

Краткий обзор состояния проблемы транспорта наносов в реках

Неудовлетворительное состояние проблемы расчета РДН является следствием нерешенности более частных вопросов, в т.ч.: разграничение наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные, учет частичной и полной подвижности руслового материала,

критические условия начала движения донных частиц. Важнейшую роль играет ограниченность и низкая точность натурных измерений.

Транспорт донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках имеет определенные особенности. Для равнинных рек они заключаются в том, что, во-первых, ввиду большой гладкости потока ($\frac{H}{d} > 30$, где H – глубина потока, d – крупность донных отложений) движение донных наносов происходит преимущественно в виде микроформ-гряд (дюн). Во-вторых, вследствие того, что минимальные и максимальные фракции донных отложений приходят в движение при близких скоростях потока, имеет место одновременное движение всей их смеси. В равнинных реках донные наносы с большей или меньшей интенсивностью движутся в течение всего года.

В горно-предгорных реках, во-первых, транспорт донных наносов происходит лишь в периоды повышенной водности (половодья, паводки). Во-вторых, частицы донных отложений приходят в движение при резко различающихся скоростях потока, что приводит к избирательному вовлечению частиц в движение и формированию русловой отмостки. Преимущественной формой транспорта наносов является бесструктурная, однако, согласно исследованиям З.Д. Копалиани, в узком диапазоне гидравлических условий донные наносы транспортируются в форме гряд.

Выделяются прямые и косвенные методы измерений РДН в речных руслах. Косвенные методы (трассеров, оптические и пр.) непригодны для массового использования в силу нерешенности проблемы надежной калибровки.

К прямым методам относятся объемный метод, измерения с помощью батометров и повторное продольное эхолотирование речного русла с движущимися микроформами. В результате подробного анализа вопроса измерения РДН батометрами Г.И. Шапов в 1954 г. сделал заключение что «все батометры не удовлетворяют основному требованию, которое к ним предъявляется: достоверности и точности учета стока наносов». Вследствие этого с 1960-х гг. в ГГИ стал разрабатываться и развиваться метод получения РДН путем расчета через высоту и скорость движения гряд, измеряемых в ходе повторного продольного эхолотирования.

Измерение РДН в горной реке в многоводный период технически затруднительно. Поэтому наиболее надежным методом измерения сегодня представляется физическое моделирование. Особенно потому, что горный поток может быть воспроизведен в лаборатории с соблюдением критериев динамического и кинематического подобия и без искажения геометрических масштабов наносов.

Выделяются два основных подхода к оценке предельных условий сдвига несвязных частиц на дне водных потоков: с помощью расчета критической скорости потока V_0 , при

которой нарушается устойчивость частиц на дне, и с помощью предельных значений влекущей силы τ_0 (касательных напряжений потока), при которых частицы, слагающие дно, начинают двигаться. В последнем случае чаще применяется безразмерная величина $\theta_0 = \frac{\tau_0}{(\gamma_T - \gamma)d}$ (коэффициент А. Шильдса), где γ_T, γ – удельные веса частиц и воды. Используются различные критические значения этого параметра. Наиболее популярным является предложенное А. Шильдсом (0,06). З.Д. Копалиани предложил в качестве наиболее обоснованного критерия начала движения частиц в горно-предгорных реках использовать величину $\theta_0 = 0,03$.

Разнородные донные отложения более подвижны по сравнению с однородными той же средней крупности. Чтобы это учесть, в расчетах критической скорости ряд авторов вводят поправочные коэффициенты вида $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}$.

Методы (иначе формулы) расчета РДН можно разделить на две основные группы: учитывающие и не учитывающие в явном виде грядовую форму перемещения донных наносов, наиболее распространенную в реках.

Формулы, учитывающие гряды, в общем виде имеют следующую структуру:

$$q_T = 0,6h_T C_T, \quad (1)$$

где q_T – расход донных наносов на единицу ширины русла в рыхлом теле (с порами), h_T – высота гряды, C_T – скорость перемещения гряды.

Почти все формулы, не использующие в своей структуре характеристики гряд, базируются на одном из трех подходов:

- *начала движения* наносов, когда в качестве критерия подвижности выбирается критическое значение скорости потока, расхода воды, касательного напряжения или энергетического уклона;
- *вероятностный*: основан на представлении о перемещении наносов, как о случайном процессе;
- *регрессионный* – это зависимости, в которых РДН является функцией нескольких переменных.

Отдельное место занимают локальные (для конкретного участка конкретного русла) и региональные (для рек определенного региона) формулы.

Проанализированы 22 российские и зарубежные работы, посвященные анализу формул высоты гряд, скорости гряд и РДН. Анализ показал, что, опираясь на их результаты в совокупности, в силу неполноты и разнородности проверяемых методов и данных измерений разработать рекомендации для выполнения практических расчетов не представляется возможным.

Гидравлическая классификация рек применительно к расчетам расхода донных наносов

В соответствии с концепцией дифференцированного подхода к расчетам РДН и особенностями их транспорта в равнинных и горно-предгорных реках, в рамках диссертации разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета РДН. Под словом «реки» в контексте исследования понимается сочетание определенных гидравлических условий. Классификация основана на данных натурных и лабораторных измерений, достоверность которых признается автором.

Равнинные реки разделены по числу Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ (где V – скорость течения, g – ускорение свободного падения), с учетом глубины, уклона и крупности донных отложений на две категории:

- с числом Фруда $Fr < 0,2$ (крупные реки),
- с числом Фруда $0,2 \leq Fr \leq 0,5$.

Горно-предгорные реки разделены по форме транспорта донных наносов:

- с грядовой формой транспорта, когда соблюдаются условия существования гряд:
 - при грансоставе, близком к однородному – ситуация срыва отмостки ($\frac{d_{90}}{d_{10}} \leq 4$):
 $\frac{H}{d_{90}} > 15 \dots 17, \frac{V}{v_0} < 4$, где d_{90}, d_{10} – процентиля крупности донных отложений по гранулометрической кривой,
 - при разнородном грансоставе: $\frac{H}{d} \geq 30, \frac{V}{v_0} < 4$.
- с бесструктурной формой транспорта.

Классификация носит неполный характер, т.к. основана на ограниченных данных измерений.

Материалы измерений

Равнинные реки

Основой для проверки методов расчета РДН в равнинных реках послужили натурные данные, полученные методом повторного продольного эхолотирования речного русла. Погрешность метода, по В.В. Романовскому и Н.М. Капитонову, 30-50%. Этот метод позволяет рассчитать РДН по формуле (1), используя данные о высоте и скорости гряд устойчивого профиля. Гряда устойчивого профиля – это гряда, морфометрические характеристики которой в процессе производства измерений остаются постоянными. С целью обеспечения репрезентативности исходных данных большая часть измерений взята из архива ГГИ (11 рек), также использованы данные по р. Хии (Япония). Выбранные данные представляют собой не

осредненные характеристики по участку эхолотирования, а данные по конкретным грядам устойчивого профиля типа дюн длиной от 2 до 8 глубин потока. Полученный массив данных состоит из 200 измерений РДН. В соответствии с принятой классификацией эти данные разделены на 2 категории.

К первой категории отнесены крупные реки с числом Фруда $Fr < 0,2$, уклонами $0,000069 \leq I \leq 0,000195^1$, 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 105 измерений РДН в реках: Дон (8 измерений), Иртыш (6), Днепр (11), Кама (5), Белая (7), Вычегда (22), Волга – два участка (33 и 13 соответственно)).

Ко второй категории отнесены реки с $0,2 \leq Fr \leq 0,5^2$, $0,000270 \leq I \leq 0,001660$, $0,20 \leq H \leq 5,40$ м и $0,26 \leq d \leq 7,5$ мм. Всего 95 измерений РДН в реках: Ануй (5 измерений), Лосиха (11), Тогоул (16), Полометь (45), Хии – три участка (10, 4 и 4 соответственно).

Диапазон гидравлических условий в использованных данных измерений представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и гряд в использованных натуральных данных

Характеристика	Диапазон изменения			
	Реки первой категории		Реки второй категории	
	min	max	min	max
Глубина потока H , м	2,90	13,7	0,20	5,40
Уклон водной поверхности	0,000069	0,000195	0,000270	0,001660
Скорость потока V , м/с	0,72	2,10	0,45	1,76
Крупность донных отложений d , мм	0,30	2,90	0,26	7,50
Высота гряд h_r , м	0,31	1,75	0,0145	1,00
Длина гряд l_r , м	15,0	120	0,79	21,0
Скорость перемещения гряд C_r , м/сут	0,96	55,0	12,0	146
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	0,09	0,19	0,13	0,50
Неразмывающая скорость V_0 , м/с	0,55	0,96	0,37	0,87
$\frac{H}{d}$	3897	38571	144	8269

¹ Уклон измерялся не на всех реках.

² На р. Лосихе в двух измерениях из 11 $Fr < 0,2$, но это не нарушает общей картины.

Горно-предгорные реки

Для апробации методов расчета РДН применительно к условиям горно-предгорных рек использованы лабораторные данные. В соответствии с приведенной классификацией они разделены по форме транспорта наносов.

Грядовое движение

Блок данных по грядовому движению донных наносов в горно-предгорных реках включает измерения 6 экспериментов в лотках и 4 на размываемых гидравлических моделях участков горно-предгорных рек. На сегодня это все данные по грядовому движению крупных наносов, в которых определены характеристики гряд. В этих данных РДН рассчитан по формуле (1), как для равнинных рек. Всего использовано 220 измерений РДН: эксперименты в лотках З.Д. Копалиани (17 и 14 измерений), В.Н. Гончарова (42), В.Ф. Пушкарева (34), Г.П. Уильямса (49), Х.П. Гая, Д.Б. Саймонса и И.В. Ричардсона (13) и на размываемых моделях рек Ньюджи (17), Хара-Мурин (21), Утулик (11) и Аносовки (2). Диапазон гидравлических условий экспериментов представлен в таблице 2. В пересчете на натуру возможно представить данные по рекам Хара-Мурин, Утулик и Аносовке: $1,00 \leq H \leq 5,25$ м, $2,83 \leq V \leq 5,89$ м/с, $0,075 \leq d \leq 0,310$ м, $0,005 \leq I \leq 0,007$, $0,53 \leq Fr \leq 1,05$, $0,30 \leq h_r \leq 1,50$ м, $0,016 \leq C_r \leq 0,103$ м/с, $9 \leq \frac{H}{d} \leq 26$, $0,09 \leq \frac{h_r}{H} \leq 0,50$, $1,20 \leq \frac{h_r}{d} \leq 8,00$.

Таблица 2 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и гряд в использованных лабораторных данных

Характеристика	Диапазон изменения	
	min	max
Ширина лотка B , м	0,075	2,440
Глубина потока H , м	0,020	0,338
Скорость потока V , м/с	0,35	1,45
Уклон водной поверхности I	0,0004	0,0100
Крупность донных отложений d , м	0,0006	0,0065
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	0,34	1,26
Высота гряд h_r , м	0,005	0,104
Длина гряд l_r , м	0,18	2,71
Скорость перемещения гряд C_r , м/с	0,00015	0,03760
$\frac{H}{d}$	9	364

Бесструктурный транспорт

Исходным материалом по бесструктурному транспорту донных наносов послужили данные трех экспериментов ГГИ в лотках, как наилучшим образом гидравлически соответствующие условиям горно-предгорных рек. Диапазон гидравлических условий экспериментов представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Диапазон изменения гидравлических характеристик в экспериментах по бесструктурному транспорту донных наносов

Характеристика	Диапазон изменения					
	Пересчет на натуру				Третий эксперимент	
	Первый эксперимент		Второй эксперимент			
	min	max	min	max	min	max
Глубина H , м	0,96	3,84	0,83	2,48	0,01	0,06
Скорость течения V , м/с	1,79	6,27	2,38	5,55	0,17	0,57
Уклон I	0,0074		0,0130		0,0045	0,0047
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	0,58	1,02	0,84	1,13	0,46	0,87
Плотность наносов в рыхлом теле $\rho_{\text{рыхл}}$, кг/м ³	1438	1764	1250	1530	1611	1728

Во всех трех экспериментах моделировался подъем паводка.

Прототипами первого и второго экспериментов послужили два участка р. Мзымты. Отличительной особенностью этих экспериментов является то, что грансостав определялся не только для грунта, подаваемого в лоток, но и для наносов, попадавших в песколовку при каждом фиксируемом расходе воды. В первом эксперименте грансостав был неоднородным ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 29$), во втором – близкий к однородному ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 2$). На рисунках 1 и 2 представлены совмещенные кривые грансоставов донных наносов на каждой стадии паводка вместе с исходными кривыми донных отложений (исходные грунты). Грансостав второго эксперимента соответствует условию, когда мелкие частицы удалены предыдущим, менее сильным паводком, и сформировалась отмостка дна.

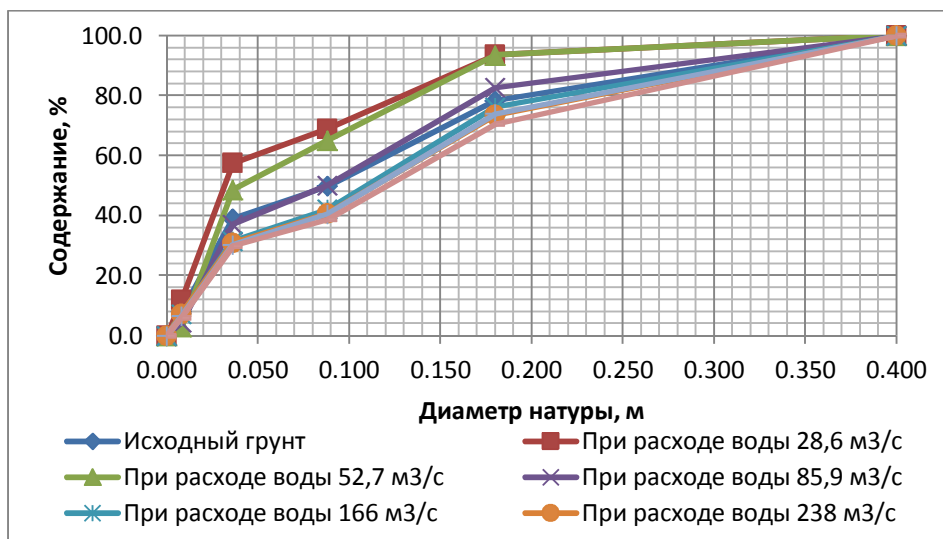


Рисунок 1 – Совмещенные интегральные кривые гранулометрического состава донных наносов каждой стадии паводка и исходных донных отложений. Первый эксперимент (пересчет на натуре)

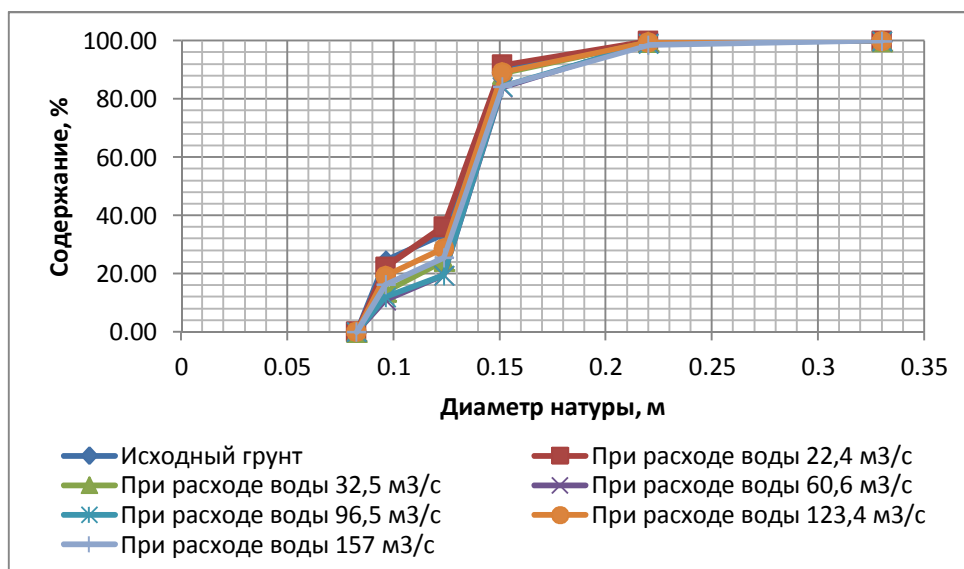


Рисунок 2 – Совмещенные интегральные кривые гранулометрического состава донных наносов каждой стадии паводка и исходных донных отложений. Второй эксперимент (пересчет на натуре)

Третий эксперимент проведен для условий р. Туапсе. Гранулометрический состав был неоднородным ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 12$). Для третьего эксперимента имеются данные только по исходному грунту. Его основные параметры: $d = 0,0014$ м, $d_{50} = 0,00076$ м, $d_{10} = 0,00017$ м, $d_{90} = 0,002$ м.

Новые эмпирические формулы

- 1) Путем аппроксимации данных по равнинным рекам первой категории получена формула для высоты гряд (рисунок 3):

$$h_r = 0,11H \quad (2)$$

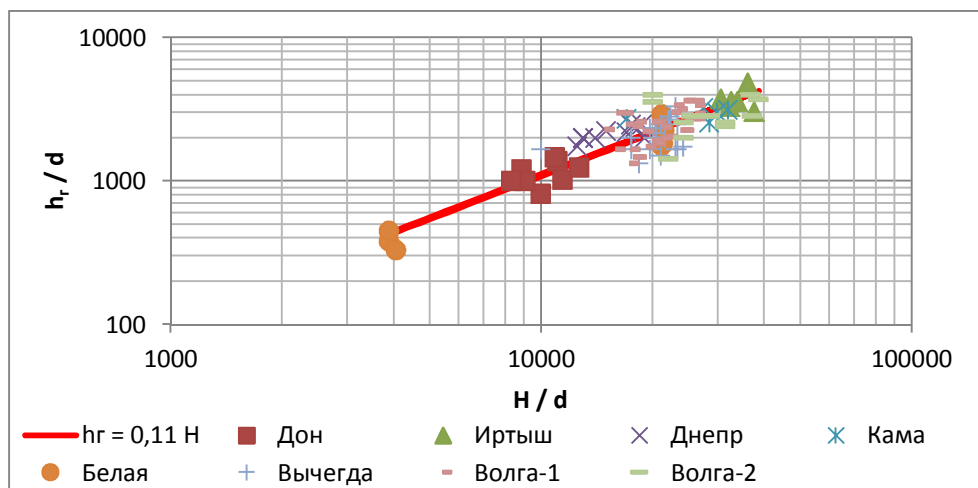


Рисунок 3 – Зависимость относительной высоты гряд от относительной гладкости потока для равнинных рек первой категории, $R^2 = 0,54$

2) Аппроксимация данных по грядовому движению крупных наносов (таблица 2) дала формулу для расчета высоты гряд в горно-предгорных реках (рисунок 4):

$$h_r = 0,22H \quad (3)$$

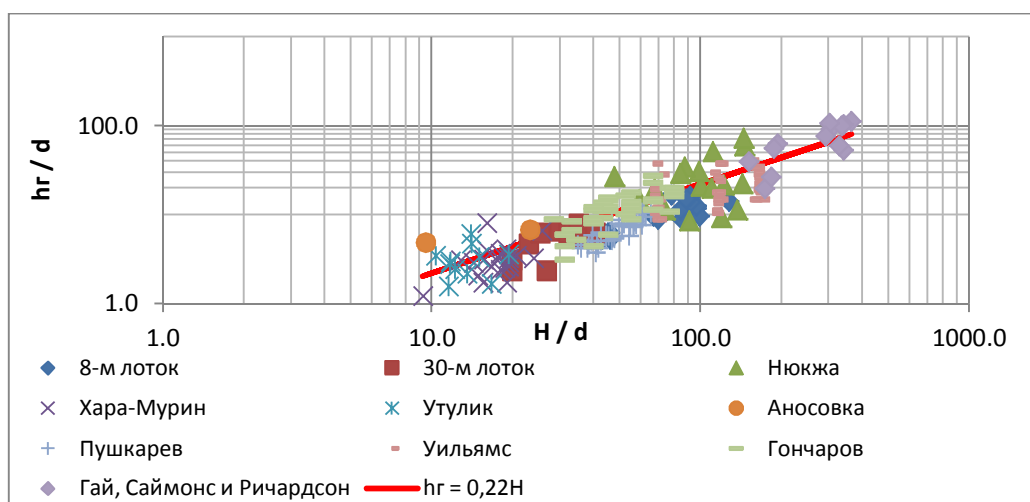


Рисунок 4 – Зависимость относительной высоты гряд $\frac{h_r}{d}$ от относительной гладкости потока $\frac{H}{d}$ в горно-предгорных реках, $R^2 = 0,74$

3) Совместное применение в соответствии с (1) формулы (3) и зависимости для скорости гряд Б.Ф. Снисченко и З.Д. Копалиани (1978) $C_r = 0,019VFr^3$ дало формулу для РДН в горно-предгорных реках:

$$q_T = 0,0025HVFr^3 \quad (4)$$

Апробация методов расчета расхода донных наносов. Результаты и рекомендации

Создан электронный архив методов расчета РДН, включающий 17 формул высоты гряд, 32 формулы скорости гряд, 84 формулы РДН, не учитывающих в явном виде характеристики

гряд, локальные и региональные формулы РДН 22 авторов. Эти формулы (кроме локальных, региональных и 15 формул скорости гряд с неопределенными параметрами), а также полученные автором, проверялись на описанных данных отдельно для выделенных категорий рек.

Формулы РДН и характеристик гряд содержат не только непосредственно измеряемые величины, но и требующие специального вычисления или задания (неразмывающая скорость V_0 , гидравлическая крупность w , параметр Шильдса θ_0 и пр.). Выражения для этих величин не являются общепринятыми, поэтому авторы формул РДН или выбирают из имеющихся, или вводят собственные. Вариативным остается и способ учета грансостава.

В ходе апробации отдельное внимание уделено проверке достоверности значений θ_0 , предлагаемых разными авторами. Каждая формула, имеющая в своем составе θ_0 , проверялась при следующих значениях этого параметра: по автору (если он предлагал собственное) или 0,06 – по Шильдсу и 0,03 – по Копалиани.

При наличии гранулометрических кривых а) проверялось влияние выбора характеристики грансостава (d , d_{50} или др.) на результаты расчета по формулам, основанным на θ_0 ; б) проверялась обоснованность поправок на неоднородность грунта при V_0 .

V_0 и w вычислялись соответственно по формулам В.Н. Гончарова (1938) и В.В. Романовского (1972). В случаях, когда автор проверяемого метода предлагал собственные выражения, расчет производился также и по ним.

Апробация формул дала следующие результаты.

Для крупных равнинных рек с числом Фруда $Fr < 0,2$ и при гидравлических условиях таблицы 1 для практических расчетов h_r рекомендуются 4 из 18 проверенных формул с погрешностью менее 30%. Лучшие результаты показали формулы С. Ялина – 23% и формула (2) – 22% (рисунок 5). Здесь и далее погрешность методов оценена по формуле

$$\Delta = \frac{|X_{\text{расч}} - X_{\text{изм}}|}{X_{\text{изм}}} 100\%, \quad (5)$$

где $X_{\text{расч}}$ – рассчитанное, $X_{\text{изм}}$ – измеренное значения исследуемой величины.

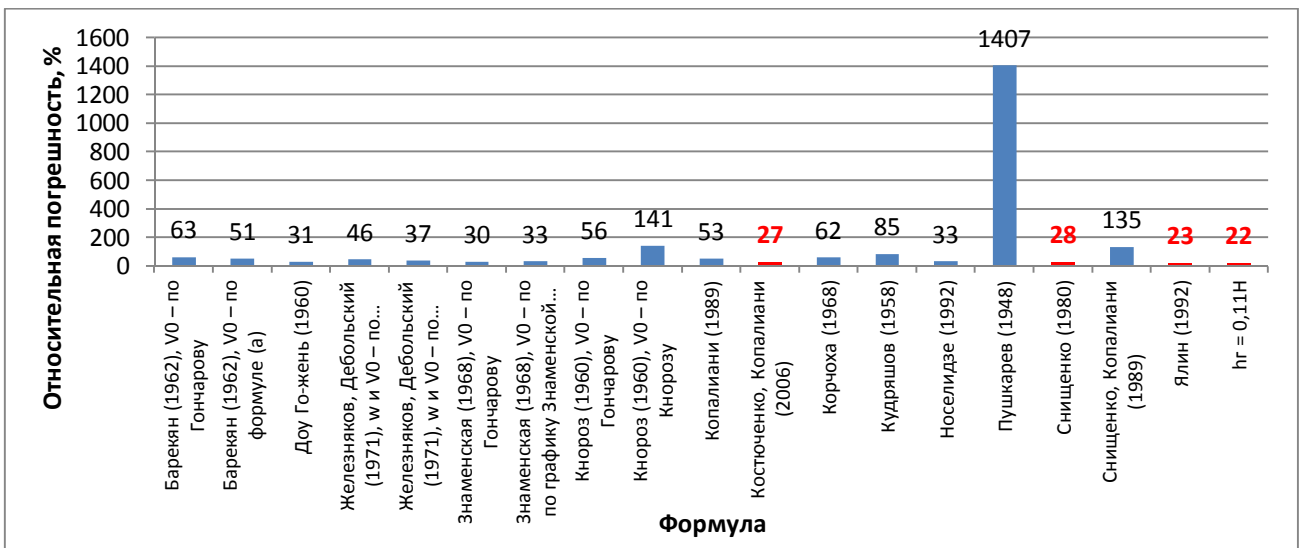


Рисунок 5 – Фрагмент результатов расчета h_r в равнинных реках первой категории

Для рек второй категории рекомендованы 4 формулы из 17 проверенных с погрешностью не более 45%: А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани (2006) – 41%, Д.В. Носелидзе (1992) – 39% и др. (рисунок 6).

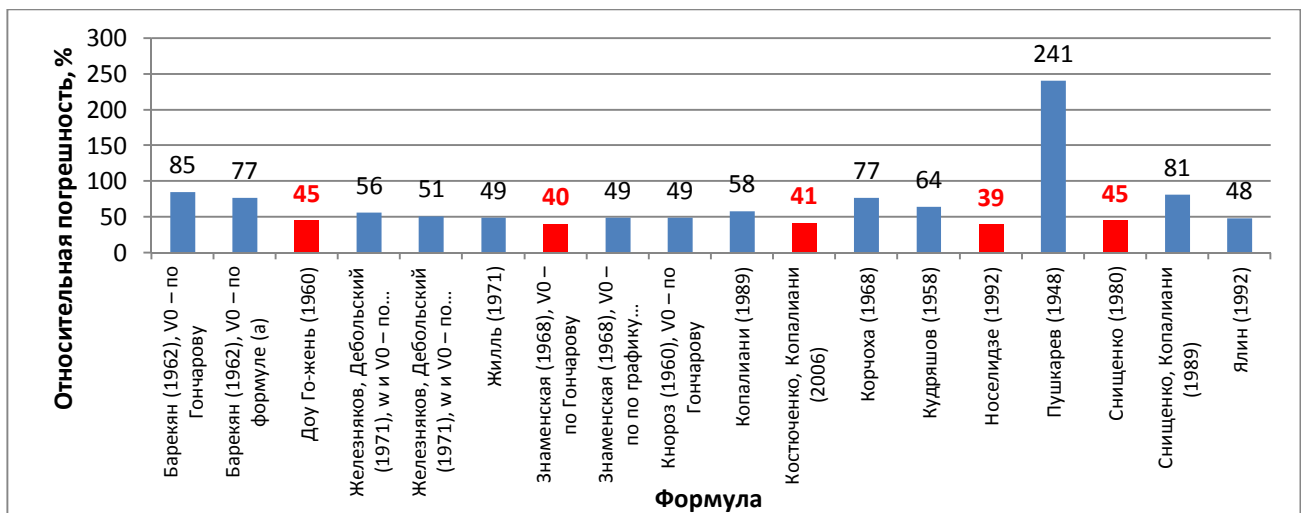


Рисунок 6 – Фрагмент результатов расчета h_r в равнинных реках второй категории

Для расчетов C_r в равнинных реках первой категории из 17 формул рекомендуются 7 с погрешностью до 60%: О.М. Кондепа и Р.Ж. Гарде (1973) – 50%, Доу Го-жень (1960) – 50% и др. (рисунок 7).

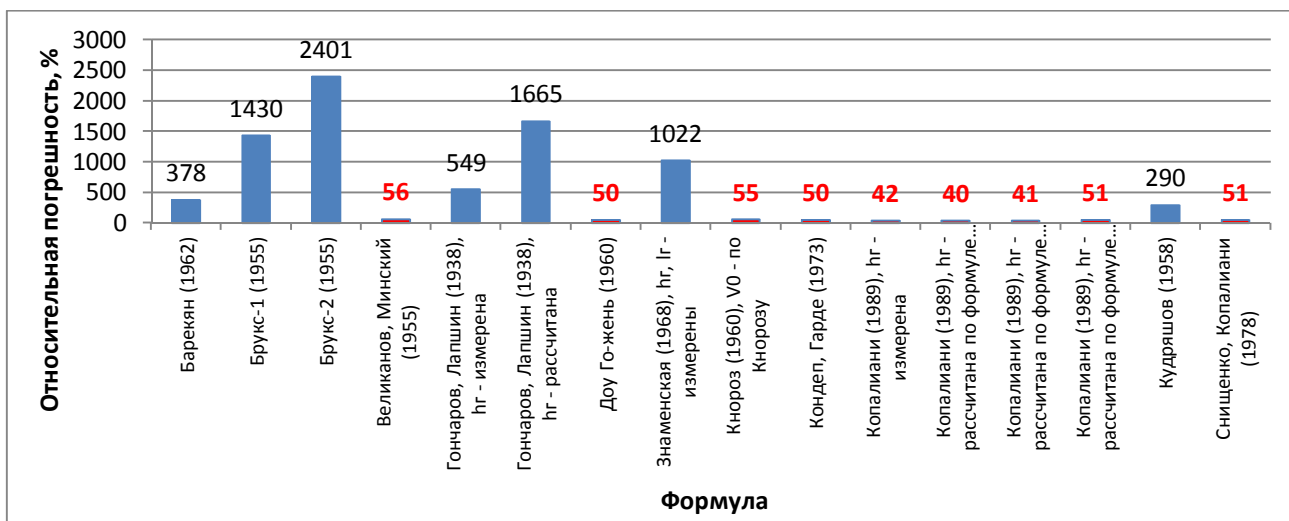


Рисунок 7 – Фрагмент результатов расчета C_T в равнинных реках первой категории

Для рек второй категории для C_T с погрешностью до 60% рекомендуются 5 формул: Т. Цубаки, Т. Кавасуми и Т. Ясутоми (1953) – 42%, и Б.Ф. Снищенко и З.Д. Копалиани (1978) – 50% и др. (рисунок 8).

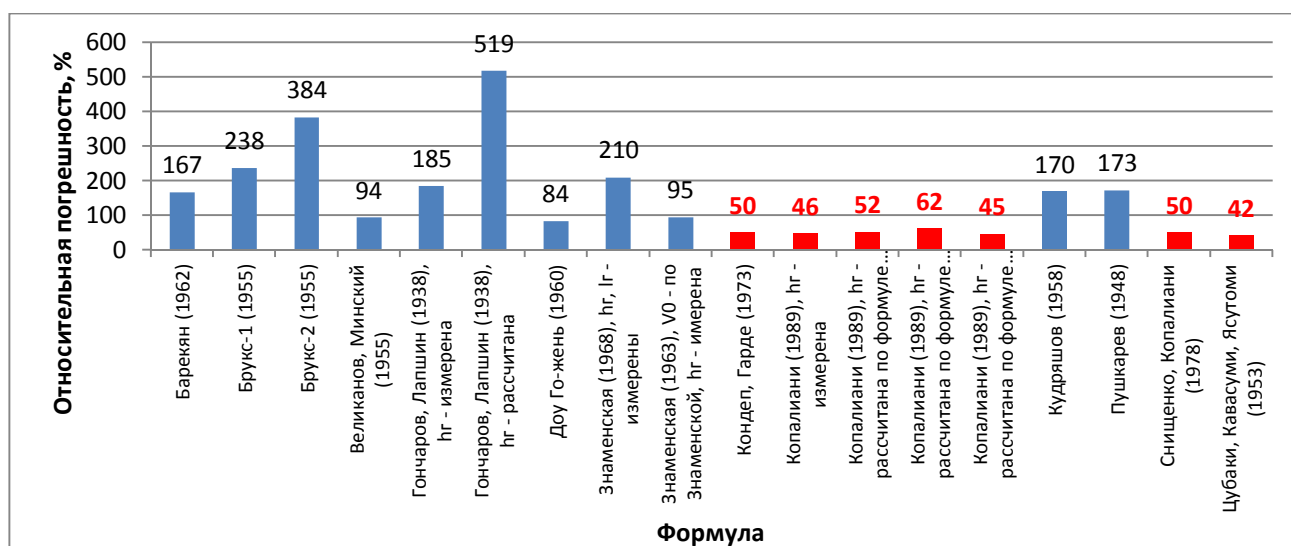


Рисунок 8 – Фрагмент результатов расчета C_T в равнинных реках второй категории

В расчетах РДН проверялось 21 сочетание формул h_T и C_T и 80 формул РДН, не учитывающих гряды в явном виде. В результате для практических расчетов РДН с погрешностью до 60% в равнинных реках первой категории рекомендовано 8 сочетаний формул h_T и C_T (в т.ч. Доу Го-жень (1960) – 53%, Копалиани (1989) – 43%) и 2 формулы, не учитывающие гряды: К.В. Гришанина (1969) – 55% и Г.И. Шамова (1952) – 59% (рисунок 9).

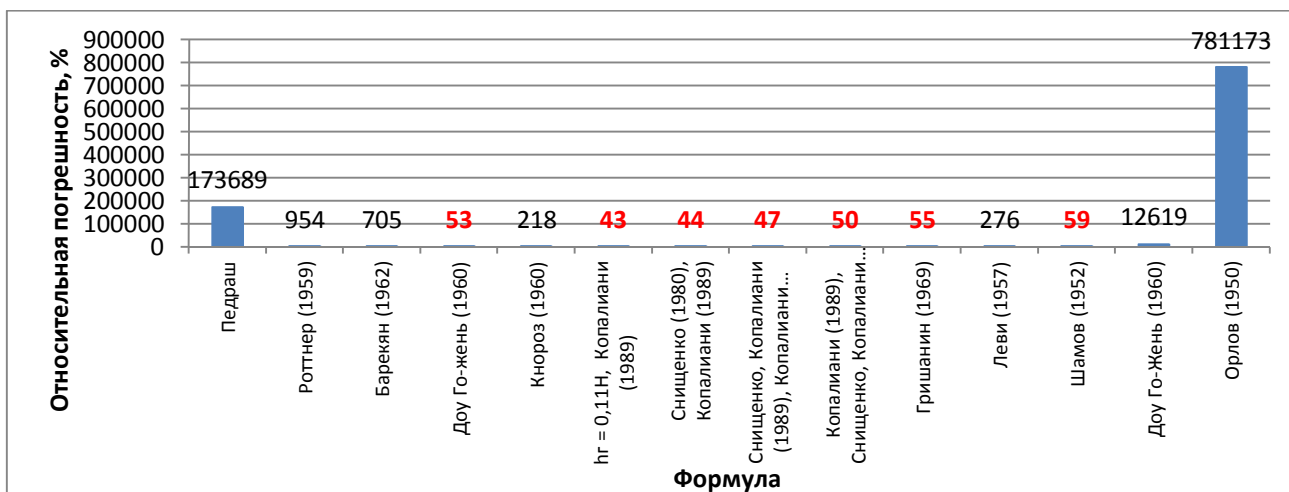


Рисунок 9 – Фрагмент результатов расчета РДН в равнинных реках первой категории

Для рек второй категории рекомендовано 10 сочетаний формул h_T и C_T (в т.ч. З.Д. Копалиани (1989) – 53%, Б.Ф. Снищенко и З.Д. Копалиани (1989) – 49%) и 2 формулы, не учитывающие гряды: А.Ф. Кудряшова – 56% и В.Н. Лазарева и Ф.М. Чернышова (1974) – 61% (рисунок 10).

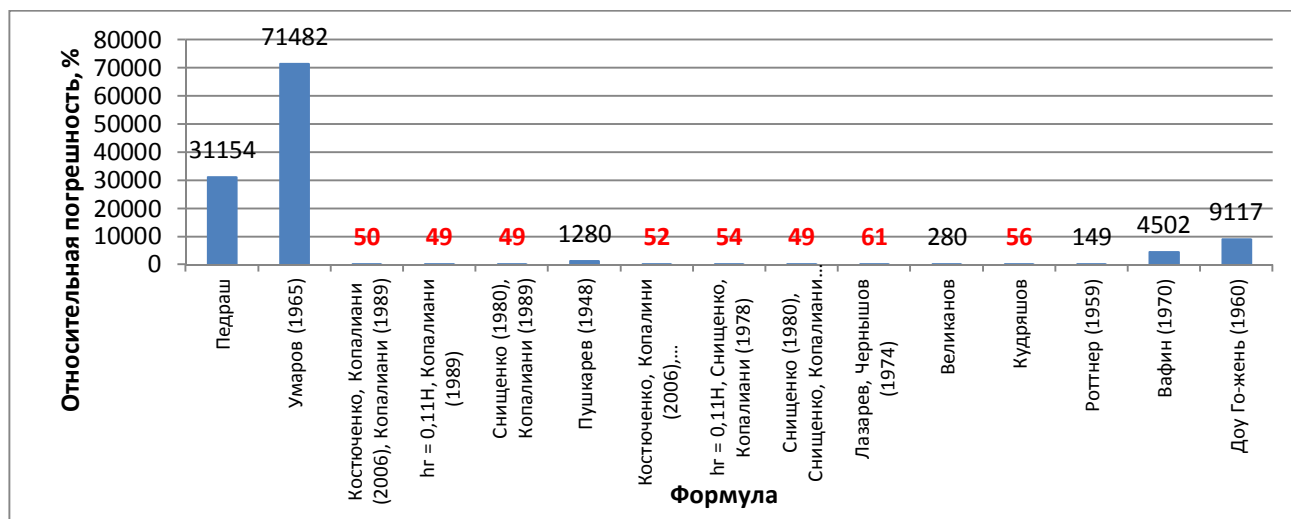


Рисунок 10 – Фрагмент результатов расчета РДН в равнинных реках второй категории

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что формулы РДН, основанные на учете h_T и C_T , для равнинных рек более эффективны, чем прочие методы расчета.

Расчеты по методам, использующим θ_0 , показали их неприменимость для равнинных рек, т.к. фактические значения θ превосходят θ_0 на 1-2 порядка. На рисунке 11 кривая начала движения Шильдса сопоставлена с данными измерений. На рисунке 12 даны результаты расчета по некоторым формулам, основанным на данном подходе.

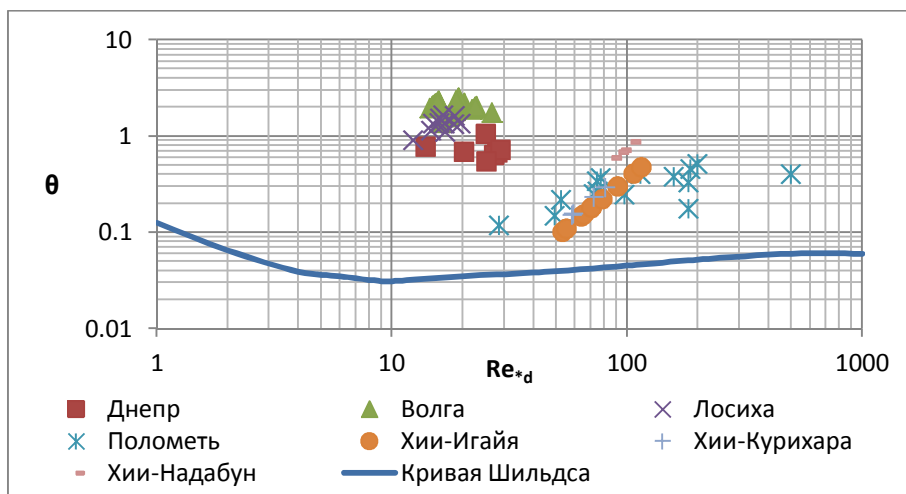


Рисунок 11 – Степень подвижности донных частиц в равнинных реках относительно кривой Шильдса. Примечание – $Re_{*d} = \frac{V_* d}{\nu}$ – число Рейнольдса частицы по динамической скорости, где V_* – динамическая скорость, ν – кинематический коэффициент вязкости

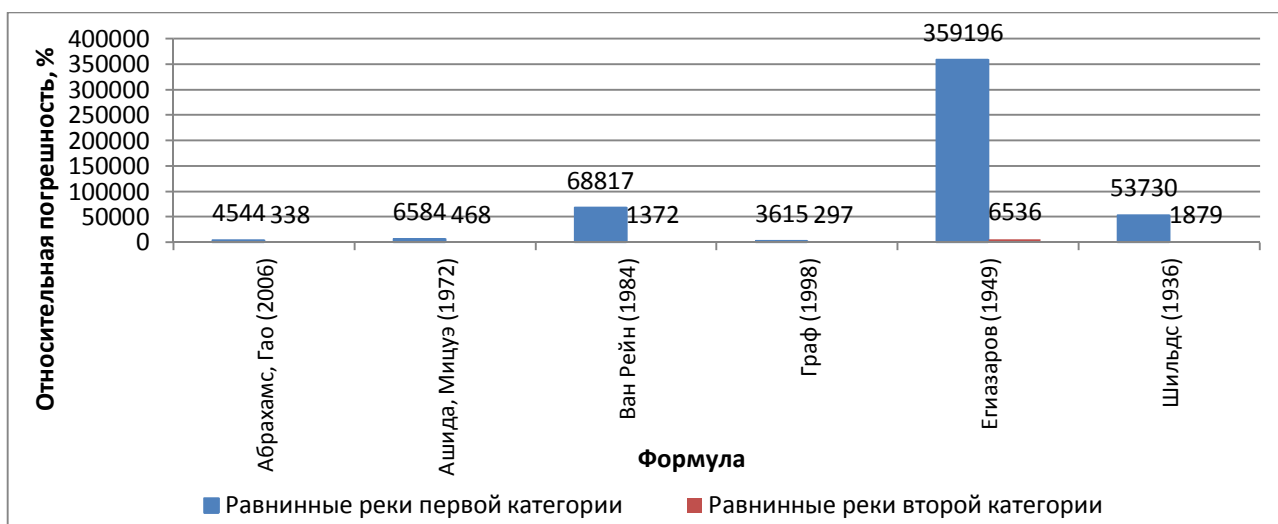


Рисунок 12 – Фрагмент результатов расчета РДН в равнинных реках по формулам, основанным на учете θ_0

При возможности измерить h_r расчет РДН рекомендуется вести по формуле (1), используя формулы C_r , которые дали лучшие результаты. Погрешность менее 60%.

Для грядового движения донных наносов в горно-предгорных реках проверялось 16 сочетаний формул h_r и C_r и 80 формул, не учитывающих гряды. С погрешностью не более 60% рекомендуются 12 формул, учитывающих гряды, (формула (4) – 58%, З.Д. Копалиани (2013) – 44%, В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938) – 48% и др.) и 1 формула, не учитывающая гряды, – В.Ф. Талмазы (1963) – 56% (рисунок 13).

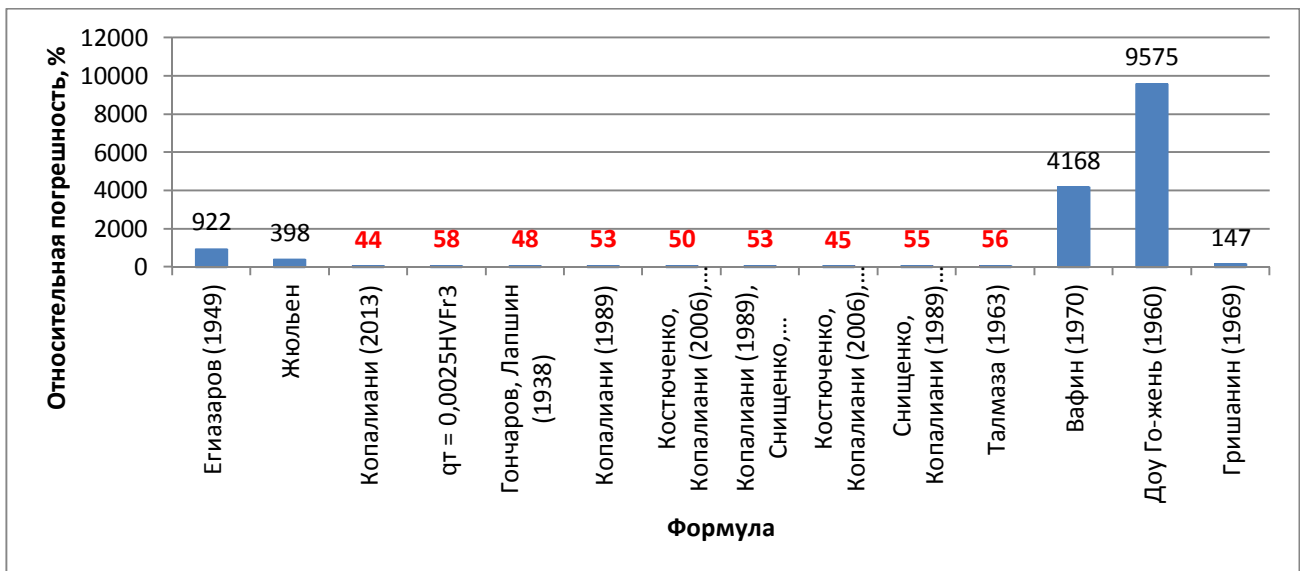


Рисунок 13 – Фрагмент результатов расчета РДН в горно-предгорных реках при грядовом движении наносов

Как и в случае равнинных рек, методы, основанные на учете характеристик гряд, для грядового движения в горных реках более эффективны, чем не учитывающие гряды.

Для бесструктурного транспорта донных наносов из 84 проверенных рекомендуются 3 формулы: Л.Г. Гвелесиани (1946), И.И. Леви (1957) и Г.И. Шамов (1952), со средней погрешностью на стадиях развитого транспорта наносов 30-47% (рисунок 14).

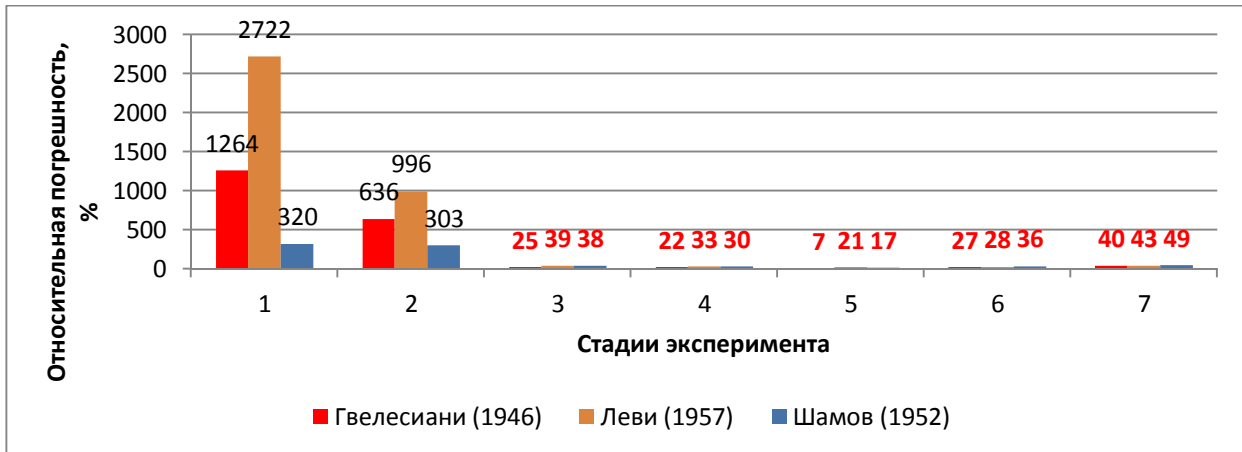


Рисунок 14 – Результаты расчета РДН в горно-предгорных реках при бесструктурном транспорте. Первый эксперимент

Анализ результатов по бесструктурному транспорту показал:

- неработоспособность всех формул в начале экспериментов (в начале паводка), т.к. на этой стадии связь между РДН и гидравликой потока носит неопределенный характер;
- в случаях неоднородного состава донных отложений выбор характеристики грансостава (d , d_{50} или др.) в формулах, основанных на использовании θ_0 , существенно влияет на результаты расчета (рисунок 15);

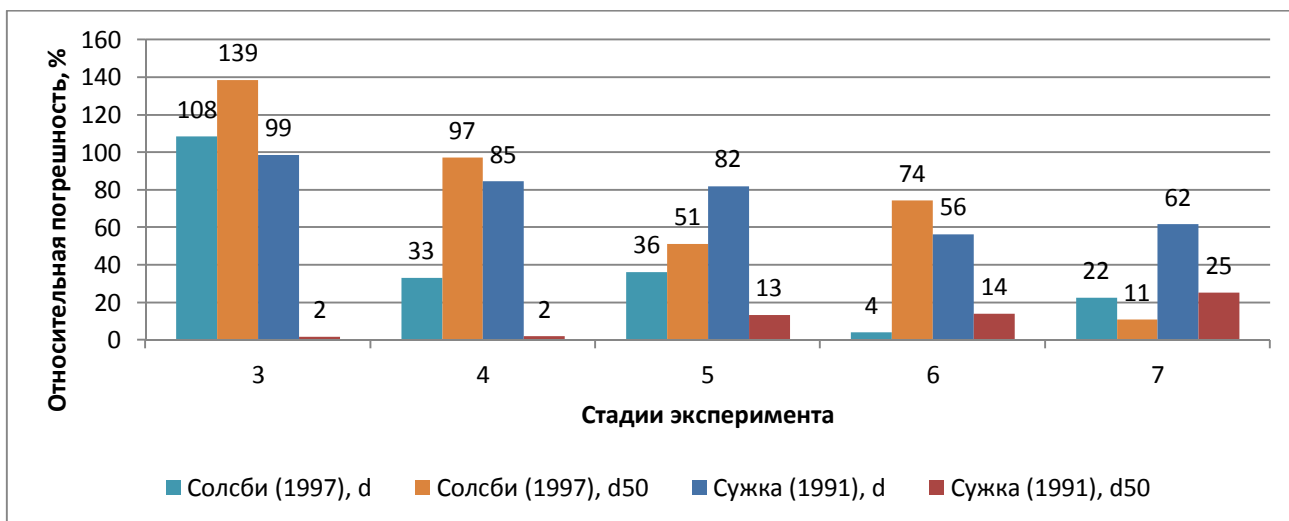


Рисунок 15 – Влияние способа учета грансостава на результат расчета РДН в горных реках.

Первый эксперимент

- $\theta_0 = 0,06$ – по Шильдсу для горной реки является завышенным. Лучше использовать $\theta_0 = 0,03$ – по Копалиани (таблица 4);

Таблица 4 – Проверка эффективности основных значений θ_0 . Первый эксперимент, грансостав донных отложений

Стадия паводка	$\theta_0 = 0,06$		$\theta_0 = 0,03$	
	d	d_{50}	d	d_{50}
1	0	0	0	1
2	0	1	1	1
3	0	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1

Примечание – Единица (1) означает $\theta > \theta_0$, ноль (0) – ($\theta < \theta_0$)

- выявлены формулы, для которых введение поправок на неоднородность грунта типа $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}$ существенного влияния на результат расчета не оказывает (рисунок 16).

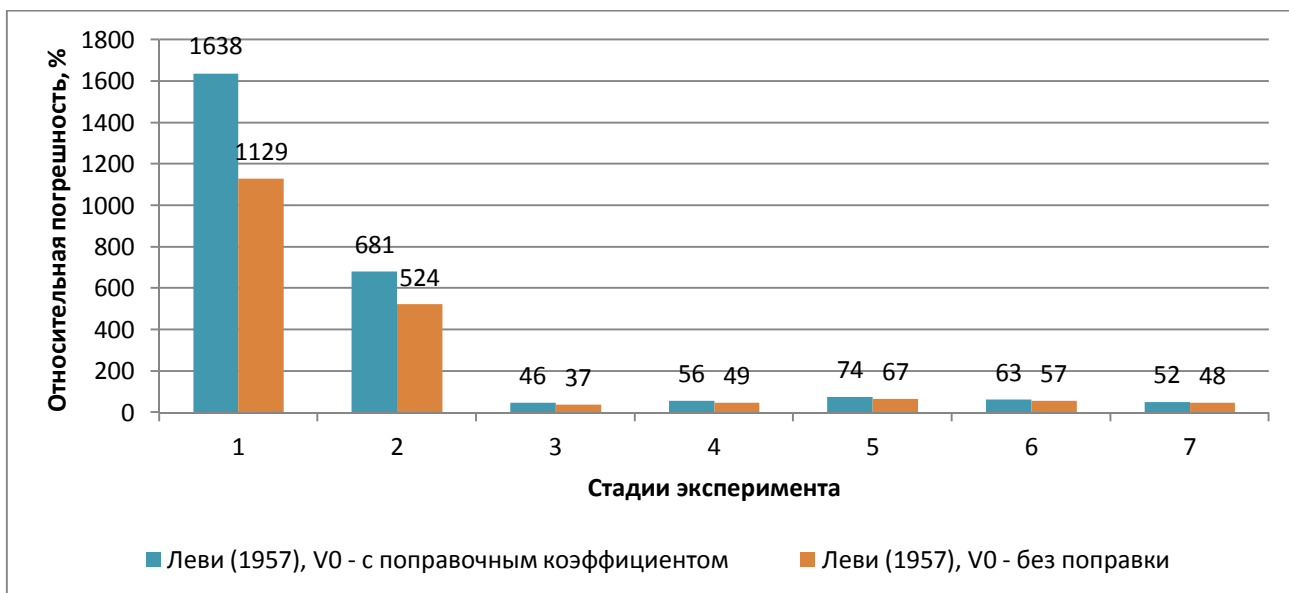


Рисунок 16 – Результат проверки обоснованности поправки на неоднородность грунта в формуле И.И. Леви (1957). Первый эксперимент

Локальные зависимости для расчета расхода донных наносов

Путем использования формул РДН, рекомендуемых выше для равнинных рек, получены локальные зависимости РДН от расхода воды $Q_T = f(Q)$ в 7 створах рек ЕТР: Юг, Тосны, Луги и Шелони. Такие зависимости позволяют удобно считать сток донных наносов. Особенность вывода этих зависимостей состоит в том, что они получены не на основе целевых многолетних наблюдений, а путем использования данных гидрологических ежегодников и единичных измерений. В таблице 5 приводится одна из зависимостей.

Таблица 5 – Зависимость $Q_T = f(Q)$ для р. Шелони в створе г. Заполье

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_T, \text{ м}^3/\text{сут}$
100	48,2
200	165
300	319
400	519
500	671
600	845
700	970
800	1189

Заключение

Основные результаты диссертации:

1. Впервые разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета РДН. Равнинные реки разделены по числу Фруда с учетом глубины, уклона и крупности донных отложений на две категории: с $Fr < 0,2$ – крупные реки и с $0,2 \leq Fr \leq 0,5$. Горно-предгорные реки разделены по форме транспорта донных наносов: с грядовой и с бесструктурной формой.
2. Впервые в результате апробации большого числа методов на базе обширных и наиболее достоверных на сегодня данных (около 60 000 расчетов РДН и характеристик гряд), разработаны рекомендации по расчету РДН отдельно для каждой из выделенных групп рек.
3. Получены новые эмпирические формулы: для расчета высоты гряд в равнинных реках с $Fr < 0,2$ $h_r = 0,11H$ (2), высоты гряд $h_r = 0,22H$ (3) и РДН $q_r = 0,0025HVFr^3$ (4) в горно-предгорных реках.
4. Уточнена технология расчета РДН в следующих аспектах:
 1. установлена непригодность методов, основанных на использовании критического касательного напряжения θ_0 , для равнинных рек, ввиду того, что фактические касательные напряжения на 1-2 порядка превышают θ_0 ;
 2. выявлено, что в условиях грядового движения донных наносов, как в равнинных, так и в горно-предгорных реках, большую эффективность, чем прочие подходы, показывают методы, учитывающие в явном виде характеристики гряд;
 3. установлено, что в случаях неоднородного состава донных отложений в горно-предгорных реках выбор характеристики грансостава в формулах, основанных на θ_0 , существенным образом влияет на результаты расчета;
 4. установлена бо́льшая достоверность значения $\theta_0 = 0,03$ – по З.Д. Копалиани, по сравнению с традиционно применяемым $\theta_0 = 0,06$ – по А. Шильдесу;
 5. выявлены формулы, для которых введение поправок на неоднородность грунта существенного влияния на результат расчета не оказывает.
5. С использованием рекомендуемых в работе формул получены локальные зависимости РДН для 7 створов рек Севера и Северо-Запада на основе минимальной гидравлической информации.
6. Созданы и зарегистрированы три специализированные базы данных достоверных измерений РДН и две базы данных методов расчета РДН.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. Самохвалова (Петровская) О.А. Расчет высоты песчаных гряд в больших и малых равнинных реках // Вестник СПбГУ. – Сер. 7. – 2011. – Вып. 4. – С. 135-148.
2. Самохвалова (Петровская) О.А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-19772> (дата обращения: 17.06.2015).

В других изданиях:

3. Samokhvalova (Петровская) О.А. Bed load assessment in plain rivers // Proc. Conference «Contemporary hydrological issues in the research of Polish and Russian MSc and PhD students» (Torun, Poland, 2012). – P. 91-103.
4. Самохвалова (Петровская) О.А. Расчеты скорости перемещения песчаных гряд в равнинных реках // Водные пути и русловые процессы. – 2013. – Вып. 1. – С. 182-200.
5. Самохвалова (Петровская) О.А., Чеботарев А.С. Расчеты расхода и стока донных наносов на горно-предгорных реках // Тезисы VII Всероссийского гидрологического съезда, 2013 (на CD).
6. Копалиани З.Д., Самохвалова (Петровская) О.А., Чеботарев А.С. Рекомендации по расчету характеристик транспорта донных наносов в горно-предгорных реках // Тр. IV международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, Грузия, 2014). – 2014. – С. 157-165.
7. Самохвалова (Петровская) О.А. К вопросу расчета расхода крупных донных наносов при их грядовой форме перемещения в речных руслах // Тр. VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2014). – 2014. – Т. 2. – С. 113-123.
8. Samokhvalova (Петровская) О.А. Selective methodology of bedload discharge calculations in rivers // Proc. International scientific conference «Deltas: genesis, dynamics, modeling and sustainable development» (Istomino, Republic of Buryatia, Russian Federation, 2014). – 2014. – С. 39-44.
9. Копалиани З.Д., Самохвалова (Петровская) О.А. Локальные формулы для расчета расхода и стока донных наносов в равнинных реках // Тр. V международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, Грузия, 2015). – 2015. – С. 119-128.
10. Самохвалов А.С., Копалиани З.Д., Самохвалова (Петровская) О.А. Гидравлико-гидрологический метод расчета расхода и стока донных наносов на равнинных реках (на

- примере р. Юг) // Водные пути и русловые процессы. – 2015. – Вып. 2. – С. 76-94.
11. Самохвалова (Петровская) О.А. О расчете расхода донных наносов в больших и малых равнинных реках // Тр. V международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, Грузия, 2015). – 2015. – С. 224-234.
 12. Самохвалова (Петровская) О.А. Расчёт расхода донных наносов в больших и малых равнинных реках при их движении в форме гряд // Водные пути и русловые процессы. – 2015. – Вып. 2. – С. 162-177.
 13. Самохвалова (Петровская) О.А., Чеботарев А.С. Расчеты расхода донных наносов на горных реках при бесструктурной форме их перемещения // Водные пути и русловые процессы. – 2015. – Вып. 2. – С. 120-128.
 14. Петровская О.А. Расчеты расхода донных наносов при грядовой форме их перемещения в горно-предгорных реках // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей. – 2018. – Т. 2. – С. 190-203.
 15. Копалиани З.Д., Петровская О.А. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» (ISSN 2313-7487). – 2017. – № 9; URL: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).
 16. Копалиани З.Д., Петровская О.А. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» (ISSN 2313-7487). – 2017. – № 8; URL: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).
 17. Копалиани З.Д., Петровская О.А. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик бесструктурного транспорта донных наносов в лабораторных экспериментах в гидравлических лотках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620958) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» (ISSN 2313-7487). – 2017. – № 9; URL: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

18. Копалиани З.Д., Петровская О.А. База данных «Формулы расчета расхода донных наносов, учитывающие в явном виде характеристики донных гряд» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621415) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» (ISSN 2313-7487). – 2018. – № 9; URL:
http://www1.fips.ru/wps/portal/ofic_pub_ru/#page=document&type=doc&tab=PrEVM&id=59C8C03F-E4B3-4076-9C0E-BE5FF6E83805 (дата обращения: 21.09.2018).
19. Копалиани З.Д., Петровская О.А. База данных «Формулы расчета расхода донных наносов, не учитывающие в явном виде характеристики донных гряд» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621406) // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» (ISSN 2313-7487). – 2018. – № 9; URL:
http://www1.fips.ru/wps/portal/ofic_pub_ru/#page=document&type=doc&tab=PrEVM&id=AEB3A4CD-3157-47C8-B0AA-3A69352AEDAF).

Петровская Ольга Андреевна

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ С
УЧЕТОМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕК

Подписано в печать _____. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times. Печать
цифровая. Усл.печ.л. 1.0. Тираж __ экз.