

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 556.536:631.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-114-122

Оригинальная статья / Original Paper

Моделирование эрозионных процессов в открытых руслах

М.Р. Магомедова

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование эрозионных процессов в открытых руслах. **Метод.** Применен стохастический подход к расчету параметров и построению моделей отдельных этапов эрозионного процесса: срыва, взвешивания и транспорта турбулентным потоком частиц размываемого грунта. **Результат.** Разработана методика прогноза общего размыва русел рек и каналов, сложенных однородными и неоднородными по крупности несвязными грунтами. Апробация методики на материале лабораторных и натурных исследований подтвердила ее удовлетворительную точность в широком диапазоне гидравлических условий и гранулометрических составов грунтов. **Вывод.** Принципы разработки модели эрозионных процессов в открытых руслах, модульная структура составленных на ее основе алгоритмов расчета и программ, позволяют совершенствовать методы расчета отдельных параметров эрозионного процесса и вносить коррективы в соответствующие модули алгоритмов и программ.

Ключевые слова: водная эрозия, диаметр частиц, удельный расход воды, мутность потока, моделирование, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток

Для цитирования: М.Р. Магомедова. Моделирование эрозионных процессов в открытых руслах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (4):114-122. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-114-122

Modeling of erosion processes in open channels

M.R. Magomedova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to model erosion processes in open channels. **Method.** A stochastic approach is applied to the calculation of parameters and the construction of models of individual stages of the erosion process: disruption, weighing and transport of eroded soil particles by a turbulent flow. **Result.** A technique has been developed for predicting the general erosion of riverbeds and canals, composed of homogeneous and heterogeneous non-cohesive soils. Apr probation of the developed technique on the material of laboratory and field studies confirmed its satisfactory accuracy in a wide range of hydraulic conditions and soil granulometric compositions. **Conclusion.** The principles of developing a model of erosion processes in open channels, the modular structure of the calculation algorithms and programs compiled on its basis, allow us to continuously improve the methods for calculating individual parameters of the erosion process and make adjustments to the corresponding modules of algorithms.

Keywords: water erosion, particle diameter, specific water consumption, flow turbidity, modeling, granulometric composition, flow velocity, sediment flow, turbulent flow

For citation: M.R. Magomedova. Modeling of erosion processes in open channels. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (4): 114-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-114-122

Введение. В современных масштабах гидротехнического и гидромелиоративного строительства в нашей стране возрастает актуальность проблемы надежности прогнозов эрозионных процессов. Водная эрозия во всех ее проявлениях наносит значительный ущерб народному хозяйству страны за счет уменьшения почвенных и водных ресурсов, снижения качества работы гидротехнических сооружений различного назначения. Эффективность и надежность гидромелиоративных сооружений неразрывно связана с проблемой устойчивости деформируемости русел и проблемой борьбы с водной эрозией.

Недостаточно обоснованный прогноз отдельных параметров и этапов водной эрозии – неразмывающих скоростей, транспортирующей способности потока, величины твердого стока, интенсивности и продолжительности процессов эрозии и аккумуляции при проектировании гидротехнических сооружений приводит к снижению надежности их работы, является одной из причин эксплуатационных неполадок, а иногда и аварий. Поэтому вопросы повышения надежности эрозионных расчетов приобретают актуальное значение как первый этап на пути решения комплекса задач по обоснованию надежности противоэрозионных мероприятий [1].

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в последнее время в решении проблемы повышения надежности прогнозов эрозионных процессов, она далека еще от окончательного решения, отвечающего современному уровню развития науки и полностью удовлетворяющего требования практики.

Многофакторность механизма водной эрозии, включающего в себя процессы срыва, взвешивания, транспорта и осаждения твердого материала в турбулентном потоке, обусловила преобладание в течение длительного времени эмпирического и полуэмпирического подхода к проблеме прогноза водной эрозии и транспорта наносов, базирующегося на упрощенных детерминистических моделях этих процессов. Полученные на этом пути решения сыграли большую роль в разработке ряда неотложных практических задач. Однако, будучи полученными, исходя из различных предпосылок и взглядов на механизм водной эрозии, на основе конкретного экспериментального материала, такие расчетные методы и формулы носят региональный характер и часто дают значительные расхождения между собой и с натурными данными, отличными от условий исходных экспериментов [1].

Постановка задачи. Совершенствование знаний о структуре водных потоков и характере русловых процессов привело к развитию взглядов на водную эрозию, как на стохастический процесс, обусловленный случайным характером вызывающих его факторов: природно-климатическими и гидрологическими условиями, изменчивостью физико-механических свойств грунтов, турбулентностью водных потоков [2]. В связи с этим в нашей стране и за рубежом появились стохастические модели и вероятностные методы расчета движения наносов, разработанные на основе использования методов теории вероятностей и теории случайных процессов [3, 4].

Недостаток ряда распространенных за рубежом чисто стохастических моделей срыва и транспорта наносов, ограничивающий возможности их практического использования, заключается в том, что они исключают из рассмотрения физическую сущность и причину эрозии и транспорта наносов – динамическое воздействие потока на частицы грунта, в связи с чем, остается необходимость введения эмпирических параметров. В последнее время в ряде исследований ученых намечается синтез детерминистического и вероятностного подхода к рассматриваемой проблеме, который представляется наиболее перспективным, так как при этом учитывается как стохастический характер взаимодействия потока и русла, так и физическая природа этого взаимодействия. Поэтому, дальнейшее совершенствование методов прогноза эрозионных процессов и транспорта наносов возможно на основе широкого привлечения к решению указанных задач математических методов теории вероятностей и теории случайных процессов, при условии более полного учета факторов, обуславливающих водную эрозию, выявления взаимных связей между ними и параметрами эрозионных процессов, более глубокого раскрытия физической сущности механизма взаимодействия потока и русла [1].

Благодаря современным достижениям в области гидромеханики, теории турбулентности, динамики русловых потоков, механики грунтов имеются необходимые предпосылки для разработки теоретических методов прогноза различных видов водной эрозии, основанных на достоверных математических моделях эрозионных процессов в широком диапазоне условий. Решение этой сложной задачи возможно при условии обеспечения достаточной степени надежности определения исходных данных и наличии достоверных математических моделей отдельных этапов эрозионных процессов.

Задача повышения надежности прогнозов эрозионных процессов требует создания таких методов, которые позволили бы производить расчет деформации русел и параметров эрозии с заданной надежностью, что возможно на основе использования математических методов теории надежности. Именно эти методы при наличии достоверных математических моделей эрозионных процессов позволят при проектировании гидромелиоративных сооружений гарантировать с заданной вероятностью отсутствие недопустимых для нормальной работы сооружения деформаций под воздействием водного потока в течение требуемого срока эксплуатации.

Методы исследования. Механизм водной эрозии всецело определяется турбулентностью русловых потоков. Согласно современным представлениям турбулентный русловой поток состоит из совокупности вихревых возмущений различных масштабов, изменяющихся от значений поперечных размеров потока до долей миллиметра.

Крупномасштабные возмущения, возникающие по спектральной теории турбулентности А.Н. Колмогорова, вследствие неустойчивости основного движения, превращают энергию осредненного движения в энергию турбулентных пульсаций. Неустойчивость крупных вихрей приводит к образованию возмущений средних размеров, а затем более мелких. Энергия турбулентных пульсаций передается по каскаду вихрей от крупных к мелким; механическая энергия мельчайших вихрей превращается в тепловую, благодаря силе внутреннего трения. Движения вихревых возмущений средних и мелких размеров в потоках с большими числами Рейнольдса не подвержено ориентирующему влиянию границ потока и подчиняется общим статистическим закономерностям.

Сведения о структуре турбулентных потоков и параметрах вихревых образований можно получить на основании исследовании эйлеровых и лагранжевых характеристик турбулентности – законов и моментов распределения мгновенных скоростей течения, корреляционных и спектральных функций.

Размеры и форма частиц обусловлены свойствами пород и условиями образования и существования частиц. Для характеристики морфологических особенностей частиц несвязных грунтов предложены различные размеры (линейные, поверхностные, объемные), а также частные и обобщенные морфологические критерии (удлиненности, уплощенности, сферичности, окатанности и др.) [5 - 7].

Морфологические особенности зерен наносов оказывают влияние на устойчивость частиц на дне, ориентацию их при движении в потоке, коэффициент сопротивления и гидравлическую крупность.

Важным фактором, влияющим на процесс водной эрозии, является гранулометрический состав. Исследования процессов формирования гранулометрического состава показывают, что основные факторы – выветривание, перенос и отложение – вызывают изменение первоначального гранулометрического состава. В одних случаях эти процессы приводят к смещению различных гранулометрических совокупностей и к образованию многовершинных распределений, а в других к дифференциации состава и упрощению распределений. Наиболее полной количественной характеристикой гранулометрического состава грунта является аналитическое выражение закона распределения размеров частиц – плотность или функция распределения. Случайный процесс последовательного дробления частиц, показал, что закон счетного их распределения по размерам асимптотически стремится к логарифмически-нормальному [8-10]:

$$n(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma d} \cdot \exp\left(\frac{\ell_n d - \ell_n d_M}{\sigma d}\right)^2 / 2\sigma^2, \quad (1)$$

где σ^2 – дисперсия логарифма диаметра частиц, d_M – медиана распределения.

Вместе с тем в многочисленных работах содержатся указания на возможность описания гранулометрического состава наносов самыми разнообразными законами распределения, как известными в теории вероятности, так и чисто эмпирическими.

Г.К. Синявский предлагает описывать состав русловых отложений гамма-распределением:

$$n(d) = \frac{1}{r(\alpha)\beta^\alpha} \cdot d^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{d}{\beta}\right), \quad (2)$$

где $d > -1$, $\beta > 0$, $r(\alpha)$ – гамма функция.

Наличие большого количества зависимостей для описания гранулометрических составов русловых грунтов и наносов свидетельствует о чрезвычайном разнообразии этих составов и невозможности точного описания их зависимостью какого-либо одного вида. Вследствие этого, в большинстве случаев, в эрозионных расчетах для учета гранулометрического состава грунта пользуются не законами распределения, а их числовыми характеристиками.

Форму кривой распределения достаточно полно характеризуют четыре числовые характеристики: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Однако на практике, применительно к описанию гранулометрических составов грунтов, получила распределение только первая из них – средневзвешенный диаметр частиц:

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i P_i}{\sum P_i}, \quad (3)$$

где d_i – средний диаметр частиц i – ой фракции, равный полусумме крайних размеров ее частиц, P_i – относительное весовое содержание этой фракции в смеси.

Согласно действующим нормативам в эрозионных расчетах однородными по крупности считаются несвязные грунты, характеризующие отношением: $d_{95}/d_5 < 5$, где d_{95} и d_5 – диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится соответственно 95% и 5 % по весу. В результате статистической обработки данных гранулометрического анализа естественных и искусственных смесей несвязных грунтов установлена статистическая связь между параметрами гранулометрических кривых:

$$P_{d_{cp}} = \begin{cases} 0.95 - 2.8k_0^2 n p u & 0 \leq k_0 \leq 0.2 \\ 0.5 + 2.1(k_0 - 0.6)^2 n p u & 0.2 \leq k_0 \leq 0.6 \\ 0.5 n p u & 0.6 \leq k_0 \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{d_{cp}}$ – ордината интегральной гранулометрической кривой, соответствующая средневзвешенному диаметру частиц d_{cp} ; k_0 – коэффициент однородности, $k_0 = \frac{d_{cp}}{d_{95}}$.

Наряду с гранулометрическим составом в эрозионных расчетах учитывается плотность частиц грунта. Вследствие преобладания в составе русловых наносов некоторых пород, плотность частиц грунта колеблется в небольших пределах – от 2,45 т/м³ до 2,76 т/м³, составляя в среднем $\rho_r = 2,65$ т/м³. Наибольшим удельным весом обладают илстые частицы, наименьшим – песчаные.

В русловом потоке поверхностный слой частиц и придонная область потока представляют собой единую систему, в которой каждый из элементов в одно и тоже время зависит от другого и влияет на него. Поэтому определение ряда характеристик поверхностного слоя ча-

стиц – средней высоты выступов шероховатости разнородного грунта, параметров ориентировки частиц на поверхности дна – невозможно без учета кинематической структуры потока.

Однако некоторые из характеристик поверхностного слоя в первом приближении могут быть рассмотрены вне связи с кинематикой потока в придонном слое и, поэтому представляется возможным установить их теоретически.

Рассмотрим однородные по крупности грунты – монодисперсную систему шаров диаметром d . В силу принятого определения поверхностного слоя, число частиц на единице площади дна n_s должно быть равно среднему числу частиц, пересеченных единицей площади случайной плоскости сечения.

Соотношение между средним числом частиц в шлифе n_s и средним числом частиц в единице объема пространства, занятого шарами, n_v :

$$n_s = n_v d, \quad (5)$$

Число частиц в единице объема грунта можно определить через коэффициент сплошности отложений β и объем одной частицы:

$$n_v = 6\beta / \pi d^3, \quad (6)$$

С учетом (5), находим среднее число частиц на единице площади дна:

$$n_s = 6\beta / \pi d^2 \quad (7)$$

В случае разнородного грунта (полидисперсная система) со статистически равномерным распределением отдельных фракций в массиве грунта, формулы (6) и (7) применимы в отдельности для каждой фракции.

Обозначая плотность объемного распределения размеров частиц в массиве грунта через $\varphi_0(d)$, для числа частиц с размерами на единице площади дна в поверхностном слое на основе (7) получаем выражением:

$$n_{ds} = \frac{6\beta \varphi_0(d) \Delta d^2}{\pi d^2}, \quad (8)$$

Среднее число частиц всех размеров на единице площади дна в поверхностном слое можно определить по формуле С.А. Салтыкова для числа сечений полидисперсной системы на единице площади секущей плоскости:

$$n_s = n_v d_{cp}, \quad (9)$$

где d_{cp} – средний диаметр шаров полидисперсной системы, найденный, исходя из закона счетного распределения размеров частиц, n_v – среднее число частиц всех размеров в единице объема массива грунта:

$$n_v = 6\beta / \pi d_{cp}^3 \quad (10)$$

Достаточно мощный поток приводит в движение наносы или сыпучую подстилку водотока. Механизм воздействия водного потока на твердую частицу, расположенную на дне, по исследованиям В.Н. Гончарова, М.А. Дементьева, М.А. Великанова, И.И. Леви, В.С. Кнорова, Ц.Е. Мирцхулава и др. можно представить следующим образом (рис. 1).

На переднюю грань частицы, расположенной на дне, поток оказывает положительное давление (лобовая сила), а на тыловой создается вакуум. Между нижней гранью частицы и дном потока происходит движение жидкости за счет разности напоров между передней и тыловой гранями. Так как абсолютное давление на переднюю грань больше, чем на тыловую, то среднее давление на нижнюю грань положительное. Вследствие искривления струи потока, обтекающей частицу, на верхней ее грани образуется отжим потока с вихревой вакуумной областью и отрицательным гидродинамическим давлением.

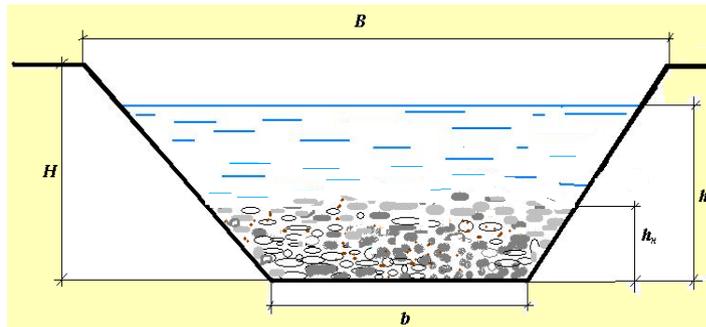


Рис. 1. Поверхностный слой частиц несвязного грунта
Fig. 1. Surface layer of non-cohesive soil particles

Результирующее давление направлено вверх. Когда частица резко выделяется над остальными, на нее действует в основном лобовое усилие и в меньшей степени подъемное давление. Сила, с которой водный поток воздействует на частицу на дне водотока, подвержена мгновенным изменениям из-за турбулентного характера движения. Трогание частиц происходит при случайной совокупности различных факторов [3].

Для оценки устойчивости размыву несвязного грунта необходимо знать площадь, покрываемую частицами поверхностного слоя на дне. Вследствие случайного характера расположения частиц в поверхностном слое, часть проекций частиц на плоскость дна взаимно перекрываются, поэтому средняя площадь, покрываемая зерном на дне, оказывается меньше максимальной площади его сечения и приблизительно равна математическому ожиданию площади сечения зерна случайной площадью.

Вследствие предположения о статистически равномерном расположении частиц в пространстве можно полагать, что случайная величина подчиняется закону равномерной плотности. Математическое ожидание площади сечения частицы случайной плоскостью, эквивалентное средней площади, покрываемой частицей грунта на дне потока, находим по формуле математического ожидания функции случайной величины [1]:

$$\bar{S} = \int_0^{d/2} S(l) \cdot f(l) \cdot \delta l = \int_0^{d/2} n \left(\frac{d^2}{4} - L^2 \right) \delta L = \frac{\pi d^2}{6}, \quad (11)$$

Обозначив через $\varphi_{os}(d)$ плотность плоскостного распределения размеров частиц поверхностного слоя; при этом $\beta_s \varphi_{os}(d) \Delta d$ будет представлять собой долю площади, занимаемой частицами поверхностного слоя размером d на единице площади дна.

В силу принятой аналогии между несвязным грунтом и системой шаров, статистически равномерно расположенных в пространстве, эта величина, согласно принципу Кавальери-Анкера, будет равна объему частиц размера d в единице объема пространства, занятого грунтом:

$$\beta_s \varphi_{os}(d) \Delta d = \beta \varphi_o(d) \Delta d, \quad (12)$$

Интегрируя равенство (12) по всем размерам частиц:

$$\beta_s \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \varphi_{os}(d) \cdot \delta d = \beta \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \varphi_o(d) \delta d, \quad (13)$$

с учетом известных в теории вероятностей соотношений:

$$\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \varphi_{os}(d) \cdot \delta d = 1 \qquad \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \varphi_o(d) \cdot \delta d = 1$$

получаем:

$$\beta_s = \beta \quad (14)$$

Следовательно, плоскостной коэффициент сплошности укладки частиц переработанного потоком поверхностного слоя грунта равен объемному коэффициенту сплошности несвязного грунта. По данным Калинске значение β составляет в среднем 0,35, по данным Пантелло-

пулоса для щебня – 0,55, что охватывает тот же диапазон значений, в пределах которого изменяется коэффициент β .

Подстановка (12) в (14) приводит к равенству:

$$\varphi_{os}(d) = \varphi_0(d), \quad (15)$$

из которого следует, что закон плоскостного распределения размеров частиц непереработанного потока поверхностного слоя русла равен закону объемного распределения размеров частиц в массиве грунта.

Выполняя интегрирование в пределах всего диапазона изменения размеров частиц, получаем:

$$\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d\varphi_{os}(d) \cdot \delta d = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d\varphi_0(d) \cdot \delta d \quad (16)$$

То есть, средний диаметр частиц поверхностного слоя грунта, определяемый как средневзвешенный по площади, занимаемой частицами в поверхностном слое, в случае непереработанного потоком разнозернистого грунта совпадает со средневзвешенным диаметром по объему частиц в массиве грунта.

Необходимость определения среднего диаметра частиц поверхностного слоя, как средневзвешенного по занимаемой частицами площади, вызвана тем, что принцип установления допускаемых неразмывающих скоростей для несвязных грунтов, основанный на равенстве напряжений срыва и сопротивляемости частиц при предельном их равновесии на дне потока, предполагает осреднение напряжений путем учета площади, занимаемой различными фракциями частиц в поверхностном слое, а не их объема.

Вследствие линейной зависимости между напряжением сопротивляемости отрыву и диаметром частиц, осреднение размеров частиц поверхностного слоя по площади дает репрезентативный диаметр смеси частиц в отношении сопротивляемости размыву поверхностного слоя грунта.

Понятие средневзвешенного по площади частиц в поверхностном слое средневзвешенного по объему в массиве грунта совпадают только в случае непереработанного потоком разнозернистого грунта (отсутствует естественная отмостка). При наличии на поверхности русла отмостки из крупных частиц их средневзвешенный размер по объему оказывается больше средневзвешенного по занимаемой площади, что следует из математического анализа соответствующих законов распределения [11-14].

Обсуждение результатов. Как было отмечено выше, среди факторов, влияющих на параметры транспорта потоком руслоформирующих наносов при водной эрозии, одним из основных является гранулометрический состав русловых отложений, который в комплексе со статистическими характеристиками турбулентности потока определяет гранулометрический состав придонных и взвешенных наносов, а, следовательно, и твердый расход. При размыве русел на расход и гранулометрический состав транспортируемых наносов существенное влияние оказывает естественная отмостка поверхности русла крупными фракциями [1].

Разработанная методика расчета руслоформирующих наносов в турбулентном потоке апробирована на опубликованных материалах лабораторных и натуральных исследований.

На рис. 2 приведено сопоставление предложенных зависимостей с экспериментальными и натурными данными, полученными по формулам других исследователей. Сопоставление с экспериментальными данными расчетных значений расхода наносов в исследованном диапазоне параметров потока и грунта дало удовлетворительные результаты.

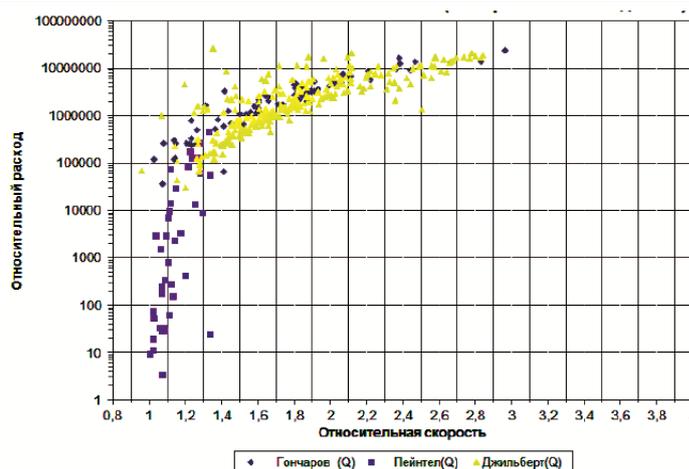


Рис. 2. Сопоставление с экспериментальными данными расчетных значений расхода
Fig. 2. Comparison with experimental data of calculated flow rates

Вывод. Основными факторами, определяющими количественные и качественные закономерности эрозионных процессов, являются: физико-механические свойства грунтов и турбулентная структура водных потоков. Разработка достоверных методов прогноза процессов водной эрозии возможна только при условии полного учета указанных выше факторов.

Среди показателей физико-механических свойств грунтов важную роль в эрозионных процессах играет гранулометрический состав поверхностного слоя грунта, непосредственно воспринимающего воздействие потока. Последний, характеризуется весовым законом распределения размеров частиц или комплексом специальных статистических характеристик: средневзвешенным диаметром, коэффициентом однородности, позиционными диаметрами частиц и др.

Процесс водной эрозии обусловлен турбулентностью водных потоков. В эрозионных расчетах среди характеристик турбулентности обычно используются только первые моменты распределения пульсаций скорости. Задача повышения надежности эрозионных расчетов требует учета таких характеристик крупномасштабной турбулентности, как средние квадратичные отклонения, корреляционные и спектральные функции, частоты пульсаций эйлеровой и лагранжевой составляющих скорости потока, а также масштабы вихревых образований.

На основе предложенного метода моделирования и прогноза эрозионных процессов разработана методика прогноза общего размыва русел рек и каналов, сложенных однородными и неоднородными по крупности несвязными грунтами. Апробация этой методики на материале лабораторных и натурных исследований подтвердила ее удовлетворительную для практики точность в широком диапазоне гидравлических условий и гранулометрических составов грунтов.

Библиографический список:

1. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.88-108.
2. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
3. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., 1967, 180 с.
4. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – 137 с.
5. Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
6. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Resources. Moscow, Res. 1977. 13. 2. P. 303-312.
7. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2015. – Т.37, - №2 - С.88-91.
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Resources. Moscow, 1986, vol. 5, P. 774-792.
9. Клауен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.

10. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2016. – Т.42, - №3 - С.106-109.
11. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 453 с.
12. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С.127-130.
13. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.
15. Магомедова М.Р. Расчетная модель движения твердых частиц в придонных турбулентных потоках // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2019. – Т.46, - №2 - С.98-107.

References:

1. Magomedova A.V. Erosion processes in the channels of rivers and canals. M.: VZPI, 1990; 88-108. (In Russ)
2. Alekseevskiy N.I. Transport of traction sediments with a developed structure of the channel relief. *Meteorology and Hydrology*. 1990; 9:100-105. (In Russ)
3. Mirskhulava Ts.E. Erosion of channels and methods for assessing their stability. M., 1967;180. (In Russ)
4. Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A. 2014; 137. (In Russ)
5. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10th International Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007; 3: 175–181.
6. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers. *Water Recurs. Moscow, Res.* 1977; 13(2): 303-312.
7. Magomedova M.R. Practical application of the author's model of transport of mineral particles. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2015; 37(2):88-91. (In Russ)
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams. *Water Recurs. Moscow*, 1986; 5: 774-792.
9. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. St. Petersburg: *Nestor-Istoriya*, 2011; 103–107. (In Russ)
10. Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the spread of suspended particles to determine areas of increased turbidity in assessing damage to water biological resources of the Cherek River. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 42(3):106-109. (In Russ)
11. Goncharov V.N. Fundamentals of channel flow dynamics. L.: *Gidrometeoizdat*, 1954: 453. (In Russ)
12. Rzhantsyn N.A. Channel-forming processes of rivers. L. :*Gidrometeoizdat*, 1985; 127-130. (In Russ)
13. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011;106: 662-673.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005; 251-258.
15. Magomedova M.R. Calculation model of the movement of solid particles in near-bottom turbulent flows. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 201; 46(2):98-107. (In Russ)

Сведения об авторе:

Магомедова Милада Руслановна, кандидат технических наук, доцент, декан факультета нефти, газа и природообустройства; n-guseinova@mail.ru

Information about author:

Milada R. Magomedova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Oil, Gas and Environmental Engineering; n-guseinova@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 02.10.2021.

Одобрена после рецензирования/ Revided 06.11.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 08.11.2021.