

**Для цитирования:** Магомедова М.Р. Математическое моделирование процессов массообмена между потоком и речными наносами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):142-150. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

**For citation:** Magomedova M.R. Mathematical modelling of mass exchange processes between flow and alluvial sediments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):142-150. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА МЕЖДУ ПОТОКОМ И РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ

**Магомедова М. Р.**

Дагестанский государственный технический университет,  
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,  
e-mail: n-guseinova@mail

**Резюме. Цель.** Целью исследования является совершенствование математической модели движения руслоформирующих наносов в части уточнения одного из основных соотношений, от которого зависит расход наносов: частоты пульсаций вертикальной составляющей скорости жидкости с гидравлическими параметрами потока. **Метод.** Математическая модель разработана с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов. **Результат.** В результате проведенного моделирования были получены сведения об объемах и площадях зон влияния повышенной мутности на водные биоресурсы реки Гизельдон. Эксплуатация Гизельдонской гидроэлектростанции привела к утере ареалов обитания зообентоса, разрушению донных биоценозов, гибели кормовых организмов планктона и бентоса, снижению кормовой базы рыб и непосредственной гибели ихтиофауны. Произведена оценка ущерба водным биоресурсам от эксплуатации Гизельдонской гидроэлектростанции, в результате которой доказано, что негативное влияние «шлейфа мутности» в нижнем бьефе реки с учетом критических показателей концентрации взвешенных веществ в воде, будет прослеживаться на протяжении 3,7 км. Размер вреда водным биоресурсам в натуральном выражении при этом составит около 1,5 т за счет гибели кормовой базы рыб и ухудшения условий обитания в зоне повышенной мутности. **Вывод.** Результаты математического моделирования апробированы на материалах натурных данных, применялись для расчета мутности потока реки Гизельдон при реконструкции Гизельдонской гидроэлектростанции. Приведены результаты апробации математической модели движения руслоформирующих наносов для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным ресурсам реки Гизельдон.

**Ключевые слова:** транспорт наносов, взвешенные наносы, донные наносы, скорость потока, расход наносов, турбулентный поток, средняя глубина

**TECHNICAL SCIENCE**  
**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

**MATHEMATICAL MODELLING OF MASS EXCHANGE PROCESSES BETWEEN FLOW  
AND ALLUVIAL SEDIMENTS**

**Milada R. Magomedova**

Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,  
e-mail: n-guseinova@mail

**Abstract Objectives** The aim is to improve the mathematical model of the motion of channel-fill deposits in terms of clarifying one of the main relationships on which the sediment flow rate depends: the frequency of pulsations of the vertical fluid velocity component with hydraulic flow parameters. **Methods** The mathematical model is developed using probability theory and the theory of runs of random processes, taking into account the normal distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities and the Rayleigh law of the distribution of their maxima. **Results** As a result of the modelling, information was obtained concerning the volumes and areas of the zones of influence of increased turbidity on the aquatic bioresources of the Gizeldon River. The operation of the Gizeldon hydroelectric power station have led to the loss of zoobenthos habitats, the destruction of bottom biocenoses, the loss of food organisms of plankton and benthos, a decrease in the fodder base of fish and the direct death of the ichthyofauna. An assessment of the damage caused to aquatic bioresources from the operation of the Gizeldon hydroelectric power station was carried out. As a result, it was proved that the negative influence of the "turbidity loop" in the lower tail of the river, taking into account the critical values of suspended matter concentration in water will be traced for 3.7 km. The amount of damage to aquatic bioresources in physical terms is about 1.5 tons due to the destruction of the fodder base of fish and the deterioration of habitat conditions in the zone of increased turbidity. **Conclusion** The results of mathematical modelling were tested on field data materials and used to calculate the turbidity of the Gizeldon River flow during the reconstruction of the Gizeldon hydroelectric power station. The results of the approbation of the mathematical model of the motion of channel-fill sediment are presented in order to identify the areas of increased turbidity during the assessment of the damage to the water resources of the Gizeldon River.

**Keywords:** sediment transport, suspended sediments, bottom sediments, flow velocity, sediment flow, turbulent flow, mean depth

**Введение.** Сложный характер движения речных наносов и отсутствие единой теории движения обусловили многообразие методов расчета твердого расхода [1-6].

При всем разнообразии имеющихся в литературе расчетных схем и методов определения расхода наносов можно выделить два различных подхода к расчету транспорта разнородного грунта.

Первый, которого придерживается большинство исследователей, заключается в том, что определение расхода смеси наносов основывается на зависимостях для расчета расхода однородного грунта, в которые вводится некоторый репрезентативный диаметр.

Второй подход состоит в определении расходов отдельных фракций по формулам для однородного грунта при последующем их суммировании в соответствии с весовым содержанием отдельных фракций в исходном грунте.

Несвязные грунты, слагающие русла водотоков, представляют собой сыпучие минеральные частицы, образующиеся в результате происходящих в природе процессов выветривания, денудации и эрозии изверженных и осадочных пород и прикрывающих их почв.

Количественные закономерности мутности потока определяются статистическими характеристиками турбулентности потока, концентрацией и гранулометрическим составом дон-

ных наносов, размерами и формами частиц. Под влиянием указанных факторов в стационарном потоке устанавливается динамическое равновесие между количеством взвешиваемых частиц и опускающихся на дно под воздействием силы тяжести.

Размеры частиц и их форма связаны со свойствами пород, условиями образования и существования частиц. Поступая в речной поток, зерна пород в результате соударения друг с другом стираются и приобретают окатанную форму, однако последняя зависит от исходной формы обломков породы. Исследования процессов формирования гранулометрического состава показывают, что основные факторы – выветривание, перенос и отложение – вызывают изменение первоначального гранулометрического состава. Этим объясняется наличие в русловых отложениях зерен разных форм.

К основным линейным размерам зерен несвязанных грунтов относятся: длина зерна, ширина, толщина. Эти величины могут быть определены либо непосредственным измерением каждого из зерен образца, либо с помощью соответствующих сит.

Вследствие преобладания в составе русловых несвязных грунтов и наносов некоторых немногих пород, удельный вес их колеблется в небольших пределах от 2,45 до 2,76, составляя в среднем 2,65 т/м<sup>3</sup>. Геометрические размеры зерен несвязных грунтов, а также их гранулометрический состав обуславливают величину шероховатости речного русла. Наиболее точной и полной количественной характеристикой гранулометрического состава является математическая интерпретация закона распределения размеров частиц, т.е. аналитическое выражение кривой распределения.

Стохастический характер турбулентности водных потоков, вследствие интенсивного перемешивания жидкости, определяет случайный характер мгновенных скоростей и гидродинамических сил  $P$ ,  $W_y$  и  $W_x$ , действующих на частицы русловых грунтов и транспортируемых русловых наносов [7].

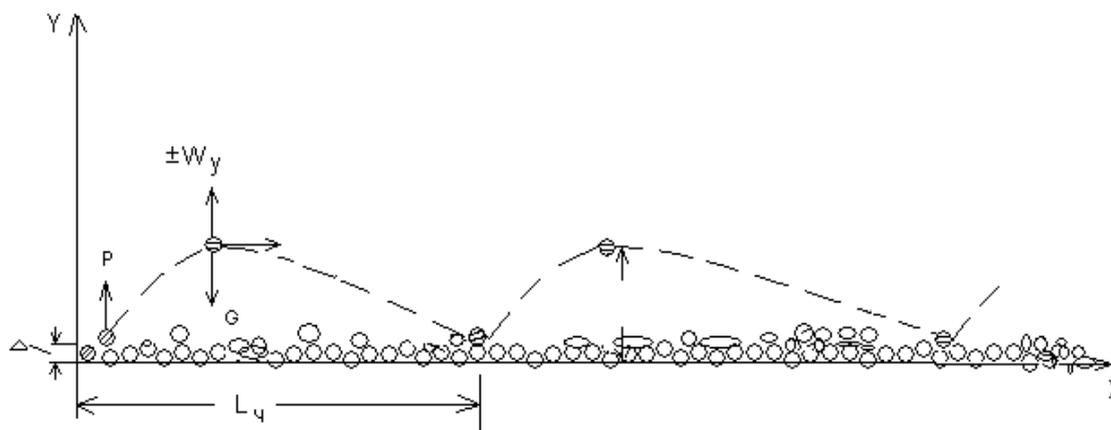


Рис.1. Силы, действующие на частицы наносов

Fig.1. Forces acting on sediment particles

**Постановка задачи.** Все вышеизложенное свидетельствует о чрезвычайной сложности анализа механизма движения частиц грунта при транспорте наносов неустановившимся потоком. Исследование процесса движения наносов и разработка методов расчета транспортирующей способности взвесенесущих потоков ведется по двум направлениям: по пути обобщения данных натуральных наблюдений и по пути создания и развития различных теорий движения наносов. Существующее состояние проблемы расчета распространения наносов в руслах рек, определение их расхода, когда отсутствуют даже нормативные документы по применению тех или иных методов в проектной практике, где более надежные методы достаточно сложны, вызывает необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета твердого расхода.

Разработанная в [6] модель больше соответствует физической природе процесса транспорта придонных наносов и лучше согласуется с экспериментальными и натурными данными, чем другие модели. Однако, в данной модели требует дальнейшего уточнения одно из основных соотношений, от которого зависит расход наносов, – связь частоты пульсаций вертикаль-

ной составляющей скорости жидкости с гидравлическими параметрами потока принята по приближенной зависимости, не проверенной на натурных данных.

**Методы исследования.** Анализ математических моделей транспорта твердых частиц водным потоком показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений движения твердых частиц, исходя из стохастической природы турбулентности водных потоков и случайного характера процессов распространения наносов, с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов [7-10].

Структура формулы предельного расхода наносов имеет следующий вид:

$$q_T = \rho_2 \frac{\pi d^3}{6} \rho_N V, \quad (1)$$

где,  $\pi d^3/6$  – объем твердой частицы,  $m^3$ ,  $\rho_N$  – среднее значение предельной счетной концентрации твердых частиц над единицей площади дна в наносонесущем слое потока высотой  $h$ ;  $V = l/t$  – осредненная скорость транспортируемых частиц наносов;  $h$ ,  $l$  и  $t$  – средние значения высоты, длины и длительности скачков.

Предельная концентрация частиц в слое потока определяется средним числом частиц  $N_c$ , срывааемых и транспортируемых одним вихревым возмущением, и концентрацией срывающих вихревых возмущений над поверхностью русла:

$$\rho_N = N_c \nu_c / \bar{u}_\Delta, \quad (2)$$

где,  $\nu_c$  – средняя частота срывающих возмущений,  $s^{-1}$ ;

$$N_c = n_s d \eta_c \frac{t l_c}{t_\Delta l}, \quad (3)$$

$n_s = 6\beta/\pi d^2$  – количество частиц поверхностного слоя грунта на единице площади дна,  $m^{-2}$ ;  $l_c = \bar{u}_\Delta \tau_c$  – средний продольный размер срывающих возмущений,  $m$ ;  $\tau_c$  – средняя длительность воздействия срывающего возмущения на частицу грунта,  $s$ ;  $\eta_c$  – вероятность срыва частиц одним вихревым возмущением;  $t_\Delta = d/v_{r\Delta}$  – длительность срыва твердых частиц,  $s$ ;  $v_{r\Delta}$  – вертикальная скорость сорванной частицы грунта на уровне  $y = \Delta$ .

Подстановка всех выражений в формулу (1) приводит ее к виду [6]:

$$q_T = \rho_{омл} d^2 \eta_c \tau_c \nu_c / t_\Delta, \quad (4)$$

где,  $\rho_{омл} = \beta \rho_2$  – плотность условных отложений,  $кг/м^3$ .

Для определения действующих на сорванные частицы грунта взвешивающих сил, а также расчета параметров траекторий наносов необходимо знать вероятностные характеристики взвешивающих областей турбулентных образований. Они могут быть выражены через амплитудные и частотные характеристики выбросов эйлеровой и лагранжевой вертикальной скорости течения за уровень гидравлической крупности с учетом критериев руслоформирующих наносов. Величины  $\eta_c$ ,  $\tau_c$  и  $\nu_c$  определяются выражениями:

$$\eta_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} f(x_2) & \text{при } \bar{u}_\Delta < u_{\Delta c} \\ 1 & \text{при } \bar{u}_\Delta \geq u_{\Delta c} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\tau_c = \frac{1 - \Phi(x_1)}{\sqrt{2\pi\bar{v}_u} f(x_1)}, \quad (6)$$

$$v_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi\bar{v}_u} f(x_1) & \text{при } \bar{u}_\Delta < u_{\Delta n}; \\ \bar{v}_u & \text{при } \bar{u}_\Delta \geq u_{\Delta n}; \end{cases} \quad (7)$$

Экспериментальными исследованиями Б.А. Фидмана по изучению пульсации вертикальной составляющей скорости частиц жидкости, измеренной вдоль их траекторий, было установлено, что колебания вертикальной скорости, обладающие наиболее значительной энергией, сосредоточены в узкой полосе низких частот. Средняя длина волны этих колебаний вдоль потока составляет примерно:

$$\lambda = 23h, \quad (8)$$

где  $h$  – глубина потока.

Средний период пульсаций будет равен:

$$\bar{\tau}_u = \frac{\bar{\lambda}}{V} = \frac{23h}{V}, \quad (9)$$

а средняя частота пульсаций:

$$\bar{v}_u = \frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{V}{23h}. \quad (10)$$

Средняя частота пульсаций эйлеровой скорости связано с измерениями числа Струхала, которое для натуральных условий в среднем может быть принято равным 0,75:

$$Sh = \frac{\bar{v}_u h}{V} \quad (11)$$

$$\bar{v}_u = \frac{0,75V}{h} \quad (12)$$

Большинство формул для расчета расхода наносов разработаны для условий движения наносов по плоскому дну и в них не учитывается влияние образующихся на дне рифелей и гряд. При грядовой форме дна частицы наносов под воздействием турбулентных возмущений перемещаются скольжением, качением и скачкообразно по пологому верховому откосу гряды и, достигнув гребня гряды, скатываются вниз по крутому низовому откосу, накапливаясь там.

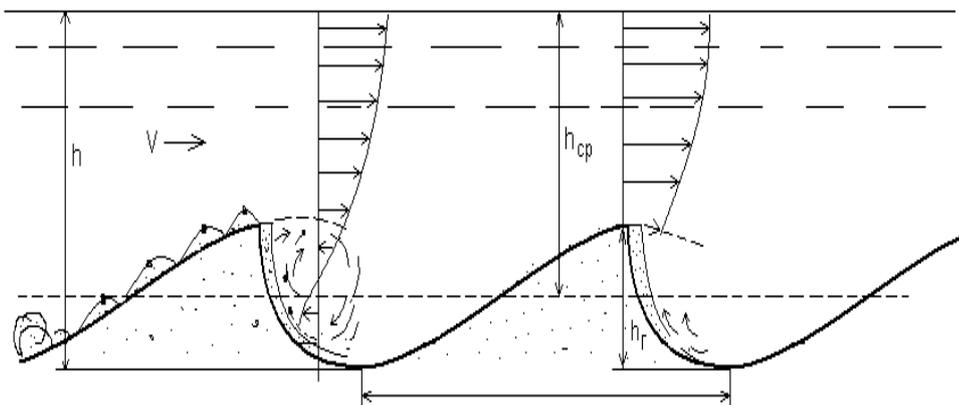


Рис. 2. Грядовое движение наносов  
 Fig. 2. Sediment movement of sediments

С возрастанием средних скоростей потока увеличивается высота подъема зерен над поверхностью верхового откоса гряды и над ее гребнем, что приводит к увеличению числа зерен, поступающих на следующую гряду транзитом через водоворотную зону.

Полувзвешенные придонные наносы переносятся турбулентными возмущениями непосредственно на верховой откос передней гряды. В результате происходит наращивание низового откоса гряд и перемещение их гребней вниз по течению. За гребнем расположена зона повышенной турбулизации, характерная для водоворотной области, в которой происходит турбулентный обмен на границах данной области с основным потоком, вращение массы жидкости вокруг горизонтальной оси, параллельной гребню.

В водоворотной зоне возникают возмущения, которые существенно отличаются от рождающихся на дне основных возмущений, которые турбулизируют весь поток, формируя поле скоростей. Влияние этих возмущений ограничивается в основном воздействием на само углубление, т. е. характер турбулизации основного потока определяется именно возмущениями, возникающими на верховом откосе донных гряд.

Турбулизация основного потока, определяющая профиль продольных скоростей, зависит от размеров выступов зерен, формирующих гряду, поэтому процесс транспорта наносов будет определяться в основном возмущениями, зависящими от диаметра частиц, образующих гряду. Мелкие частицы наносов непрерывно циркулируют в водоворотной зоне, часть их задерживается на откосе и прикрывается более крупными, и на смену им в эту зону поступают новые [6, 11-15].

С учетом пульсаций скорости течения, гидродинамических сил и путем введения в формулу вероятностных критериев срыва частиц, полученных на основе предположения о нормальном законе распределения пульсаций гидродинамических сил, а также образующихся на дне рифелей и гряд, влияющих на кинематические характеристики потока, а следовательно, и транспорт наносов построена формула:

$$q_T = \rho_z \beta P_0 d^2 \eta_c l_c \bar{v}_u / t_{\Delta} \bar{u}_{\Delta} \quad (13)$$

Дальность переноса донных и взвешенных наносов, определяем по зависимостям:

$$l_{\text{вз}} = V_{\text{вз}} t_{\text{вз}} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[ 1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} V_{\text{вз}} t_{\text{вз}} \right] \quad (14)$$

$$l_{\text{дон}} = \bar{v}_{\Delta c} t_{\text{дон}} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[ 1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} \bar{v}_{\Delta c} t_{\text{дон}} \right]. \quad (15)$$

Длину участка, на котором выпадут наносы, т.е. путь, на протяжении которого выпадут наносы рассматриваемой крупности, определяем по формуле:

$$L = \frac{H}{\omega} V, \quad (16)$$

где,  $H$  - средняя глубина на участке длиной  $L$ ,  $\omega$  - гидравлическая крупность наносов,  $V$  - скорость течения воды.

**Обсуждение результатов.** Случайный характер процесса транспорта наносов обуславливает правильность применения данного подхода, так как все физически реальные случайные процессы представляют собой непрерывные функции «времени» [6].

Результаты моделирования применялись для определения мутности потока в реке Гизельдон при реконструкции Гизельдонской ГЭС [10].

Наносы реки Гизельдон представлены следующим гранулометрическим составом (табл.1).

Массив охватывает следующий диапазон изменения гидравлических характеристик потока и русла: расход воды  $Q = 2,16 \dots 11,20 \text{ м}^3/\text{с}$ , глубина потока  $h = 0,3 \dots 2,5 \text{ м}$ , ширина потока  $b = 3,5 \text{ м}$ , средняя скорость потока  $V = 0,5-1 \text{ м/с}$ , диаметр частиц наносов  $d = 0,005 \dots 2 \text{ м}$ , измененный уклон на участке  $i = 0,011 \dots 0,092$ , коэффициент шероховатости  $n = 0,042 \dots 0,096$ .

**Таблица 1. Гранулометрический состав р. Гизельдон**  
**Table 1. The granulometric composition of the river Giseldon**

d, мм	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0.01
%	18,8	7,4	4,1	6,5	3,0	0,3	0,1	0,1

Результаты моделирования сгруппированы в таблицу 2.

**Таблица 2. Расстояние от створа гидроузла до места выпадения наносов**  
**Table 2. Distance from the site of the hydrosystem to the site of sedimentation**

Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
340	740	1850	3703,7	7407,4	37037

1. Относительное содержание взвешиваемых фракций в грунте 0, 65286.
2. Максимальный диаметр взвешиваемых фракций,  $d = 0,001610 \text{ м}$ .
3. Средний диаметр взвешиваемых фракций,  $d = 0,000528 \text{ м}$ .
4. Средняя гидравлическая крупность взвешиваемых фракций,  $w = 0,05382 \text{ м/с}$ .
5. Средняя частота взвешивающих вихревых возмущений,  $nub = 0,9195 \text{ 1/с}$ .
6. Вероятность взвешивания сорванных частиц,  $eb = 0,0759$ .
7. Эффективная скорость продольного переноса частиц,  $v = 0,765 \text{ м/с}$ .
8. Высота подъема взвешенных наносов,  $h = 0,1362 \text{ м}$ .
9. Длительность переноса частиц взвешенных наносов,  $t = 6,25624 \text{ с}$ .
10. Удельный расход придонных наносов,  $q = 0,016259 \text{ кг/с/м}$ .
11. Удельный расход взвешенных наносов,  $q = 0,024303 \text{ кг/с/м}$ .
12. Удельный расход руслоформирующих наносов,  $q = 0,040562 \text{ кг/с/м}$ .
13. Средняя мутность потока,  $r = 0,06142 \text{ кг/м}^3$ .

**Вывод.** Учитывая сложность описания процессов транспортировки наносов водным потоком, а также значительные расхождения между экспериментальными и натурными данными, получаемыми по многим полуэмпирическим формулам определения расхода наносов, соответствие предложенной математической модели и полученной на ее основе формулы расхода наносов экспериментальным и натурным данным можно считать удовлетворительным.

В результате проведенного моделирования были получены сведения об объемах и площадях зон влияния повышенной мутности на водные биоресурсы р. Гизельдон. Строительство и эксплуатация Гизельдонской ГЭС привели к утере ареалов обитания зообентоса, разрушению донных биоценозов, гибели кормовых организмов планктона и бентоса, снижению кормовой базы рыб и непосредственной гибели ихтиофауны.

Произведена оценка ущерба водным биоресурсам от эксплуатации Гизельдонской ГЭС, в результате, которой получено, что негативное влияние «шлейфа мутности» в нижнем бьефе реки с учетом критических показателей концентрации взвешенных веществ в воде, будет прослеживаться на протяжении 3,7 км. Размер вреда водным биоресурсам в натуральном выражении при этом составит около 1,5 т за счет гибели кормовой базы рыб и ухудшения условий обитания в зоне повышенной мутности.

#### Библиографический список:

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ. 1998. – С.95-114.
2. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.

3. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел// Журнал университета водных коммуникаций. – СПб, т.2 , 2010. – С.90-93.
4. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках: сборник работ по гидрологии. – СПб.:Гидрометеиздат, 2004. – № 27. – С. 25–40.
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
6. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.98-108.
7. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – С.53-68.
8. Магомедова А.В., Магомедова М.Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2013. – Т.29. – №2– С.58-64.
9. 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.
10. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2015. –Т.37, - №2 - С.84-91.
11. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С.127-130.
12. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. *TheJournalofGeology*, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.
13. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, CoastalandShelfScience*. 2005, pp.251-258.
14. Kopaliani 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.
15. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *JournalofHydraulicEngineering*. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.

#### References:

1. Alekseevskiy N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov. M.: Izd-vo MGU; 1998. S. 95-114. [Alekseevskiy N.I. Formation and moving of the river sediments. Moscow: Izd-vo MGU; 1998. P. 95-114. (in Russ.)]
2. Alekseevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'efa. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1990;9:100-105. [Alekseevskiy N.I. The transport of moving sediments with the developed structure of the bed relief. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1990;9:100-105. (in Russ.)]
3. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Gidravlichesкое soprotivlenie rechnykh rusel. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*. 2010;2:90-93. [Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Hydraulic resistance of the river beds. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2010;2:90-93. (in Russ.)]
4. Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Raschety raskhoda donnykh nanosov v rekakh: sbornik rabot po gidrologii. SPb.: Gidrometeoizdat. 2004;27:25–40. [Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Calculations of sediment flow rates in rivers: work collection on hydrology. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat. 2004;27:25–40. (in Russ.)]
5. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa. SPb.: Nestor-Istoriya; 2011. S. 103–107. [Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and bed process. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya; 2011. P. 103–107. (in Russ.)]
6. Magomedova A.V. Erozionnye protsessy v ruslakh rek i kanalov. M.: VZPI; 1990. S.98-108. [Magomedova A.V. Erosion processes in river beds and channels. M.: VZPI; 1990. P.98-108. (in Russ.)]
7. Magomedova M.R. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh. Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A.; 2014. S.53-68. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of near-bottom sediment movement in open beds. Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A.; 2014. P.53-68. (in Russ.)]
8. Magomedova A.V., Magomedova M.R. O faktorakh, obuslovlivayushchikh protsess transporta rusloformiruyushchikh nanosov. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*.

- Tekhnicheskie nauki. 2013;29(2):58-64. [Magomedova A.V., Magomedova M.R. About the factors determining the transport process of bed-forming sediments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013;29(2):58-64. (in Russ.)]
9. Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoe matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;42(3):106-109. [Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitation mathematical modeling of suspended particle distribution for the determination of high turbidity zones during the harm evaluation of the river Cherek water biological resources. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42(3):106-109. (in Russ.)]
  10. Magomedova M.R. Prakticheskoe primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;37(2):84-91. [Magomedova M.R. Practical application of an original transport model of mineral particles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;37(2):84-91. (in Russ.)]
  11. Rzhnitsyn N.A. Rusloformiruyushchie protsessy rek. L.: Gidrometeoizdat; 1985. S.127-130. [Rzhnitsyn N.A. River bed-forming processes. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. P.127-130. (in Russ.)]
  12. Dade W.B., Friend P.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology. 2011;106(6):662-673.
  13. Camenen B., Larson M. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005;63:249-260.
  14. Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow. 2007;3:175-181.
  15. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003;129(2):120-128.

**Сведения об авторе:**

**Магомедова Милада Руслановна** – кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства, докторант кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

**Information about the author:**

**Milada R. Magomedova**—Cand. Sc.(Technical), Doctoral student, Department of Building Constructions and Hydraulic Structures

**Конфликт интересов**

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

**Поступила в редакцию** 03.05.2017.

**Received** 03.05.2017.

**Принята в печать** 20.05.2017.

**Accepted for publication** 20.05.2017