

Для цитирования: 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; 42 (3):92-100. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-92-100.

For citation: Grigoryan O.P., Magomedova M.R. IMITATION MATHEMATICAL MODELING OF SUSPENDED PARTICLES EXPANSION TO DETERMINE THE AREAS OF INCREASED TURBIDITY IN THE ASSESSMENT OF DAMAGE TO WATER BIOLOGICAL RESOURCES OF THE CHEREK RIVER. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42 (3):92-100. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-92-100

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-92-100

Григорьян О.П.<sup>1</sup>, Магомедова М.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский филиал Каспийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства, 367022, г. Махачкала, ул. Абубакарова, д.104  
e-mail: dokaspiy@mail.ru ,

<sup>2</sup>Дагестанский государственный технический университет, 367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, n-guseinova@mail.ru

### ИМИТАЦИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ МУТНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ УЩЕРБА ВОДНЫМ БИОЛОГИЧЕСКИМ РЕСУРСАМ РЕКИ ЧЕРЕК

**Аннотация.** *Цель.* Оценить ущерб водным биоресурсам от эксплуатации Нижне-Черекских ГЭС (Каихатау, Аушигерской). **Методы.** Приведены результаты апробации имитационной математической модели распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек от эксплуатации каскада Нижне-Черекских ГЭС. Для установления основных характеристик годового и сезонного стока в створах гидротехнических сооружений на реке Черек использованы сведения о стоке в опорных гидрологических створах Гидрометеослужбы, обобщённые в справочниках «Ресурсы поверхностных вод». **Результат.** Математическая модель, разработанная на основе теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и закона Релея для распределения их максимумов использована для расчета «шлейфа мутности» при промыве отстойника головного узла и при глубинном промыве головного узла Каихатау ГЭС. **Вывод.** В результате проведенных исследований получено, что негативное влияние «шлейфа мутности» в реке Черек, будет прослеживаться на протяжении приблизительно 3 км.

**Ключевые слова:** транспорт наносов, взвешенные наносы, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток, средняя глубина

Olga P. Grigoryan<sup>1</sup>, Milada R. Magomedova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Scientific Institution, Caspian Fisheries Research Institute, Daghestan branch, 104, Abubakarov Ave, Makhachkala, 367022,  
<sup>2</sup>Daghestan State Technical University, 70 I. Shamil Ave, Makhachkala, 367015

### IMITATION MATHEMATICAL MODELING OF SUSPENDED PARTICLES EXPANSION TO DETERMINE THE AREAS OF INCREASED TURBIDITY IN THE ASSESSMENT OF DAMAGE TO WATER BIOLOGICAL RESOURCES OF THE CHEREK RIVER

**Abstract. Aim.** Assessment of damage to aquatic bioresources. **Methods.** This article presents the results of testing of the simulation mathematical model of propagation of suspended particles to determine the areas of increased turbidity in the assessment of damage to Cherek River water biological resources because of Nizhne-Cherek HPS Cascade exploitation. In order to establish the basic characteristics of annual and seasonal runoff in the hydraulic structures dam locations on the river Cherek are used data on runoff in support hydrological dam locations of the Hydrometeorological Service, generalized in the reference book "Surface water resources." **Results.** A mathematical model developed on the basis of probability theory and stochastic processes emissions theory, based on the normal law of distribution of horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocity and Rayleigh law for the distribution of their peaks is used to calculate the "turbidity plume" in the washing of the head unit settler and deep washing of Kashkhatau HPS head unit. **Conclusion.** The studies found that the negative impact of "turbidity plume" in the Cherek river will be traced for approximately 3 km.

**Key words:** drift transport, suspended drift, granulometric composition, current speed, drift discharge, turbulent flow, average depth

**Введение.** Горные и предгорные реки Кавказа, особенно в их верховьях, отличаются сравнительно быстрым течением, паводковым режимом, относительно низкими температурами в течение всего года, значительными сезонными колебаниями содержания взвешенного и влекомого материала.

Река Черек – правобережный приток р. Баксан образуется от слияния рек Черек Безенгийский и Балкарский. Истоки притоков находятся в ледниках центральной части Большого Кавказа. Соединившись в один поток, Черек Балкарский и Безенгийский текут одним руслом, лишь в отдельных местах разбиваясь на ряд рукавов. Длина реки составляет 79 км, водосборная площадь равна 3070 км<sup>2</sup>. Бассейн расположен в пределах высот от 4000 м в верховьях до 350 м - в устьевой части. Площадь водосбора в створе плотины Советской (Кашхатау) ГЭС составляет 1350 км<sup>2</sup>.

Материалом для проведения расчета ущерба водным биологическим ресурсам от эксплуатации Кашхатау (Советской) и Аушигерской ГЭС послужили комплексные гидробиологические исследования за ряд лет, проводившиеся ДФ ФГБНУ «КаспНИРХ», в том числе результаты гидробиологических съемок, осуществленных в районе влияния гидроэлектростанций в летне-осенний период 2015г.

При возведении каскада Нижне-Черекских ГЭС в основном русле реки Черек построены плотины Кашхатау ГЭС (головная) и Аушигерской ГЭС (резервная).

Примерное расстояние от плотины Кашхатау ГЭС до плотины Аушигерской ГЭС (по руслу реки) составляет 8 км. Расстояние от плотины Аушигерской ГЭС до точки сброса отработанной Аушигерской ГЭС воды составляет также 8 км.

Из-за забора большей части расхода реки Черек в деривацию на участке реки от водозаборной плотины Кашхатау ГЭС до точки сброса отработанной Аушигерской ГЭС воды происходит снижение площади русла реки на 68%.

Протяжённость находящегося в зоне воздействия каскада Нижне-Черекских ГЭС участка реки Черек составляет 16 км. При средней ширине русла реки 30 м, площадь русла реки Черек, подвергающегося воздействию каскада ГЭС составляет порядка 480 000 м<sup>2</sup> (или 48 га).

Потеря площади русла реки от забора большей части расхода воды в деривацию каскада Нижне-Черекских ГЭС (68%) составит 32,64 га или 326 400 м<sup>2</sup>.

Для определения параметров и расчётных величин годового стока р. Черек был использован 62-х летний ряд наблюдений за стоком в опорном гидрологическом створе -Кашхатау. Параметры кривой обеспеченности и средние годовые расходы воды различной расчетной обеспеченности реки Черек в створе плотины Кашхатау ГЭС приведены в таблице 1.

**Таблица 1-Параметры кривой обеспеченности и средние годовые расходы воды**

Створ	А, км <sup>2</sup>	M <sub>0</sub> , л/с·км <sup>2</sup>	Параметры кривой обеспеченности			Расходы воды, м <sup>3</sup> /с различной обеспеченности, Р, %			
			Q, м <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	10	50	75	95
Советская ГЭС	1350	30,2	40,8	0,13	2C <sub>v</sub>	47,7	40,6	37,1	32,6

Внутригодовое распределение стока р.Черек в створе плотины головного узла Советской (Кашхатау) ГЭС за характерные по водности годы приведено в таблице 2.

**Таблица 2-Внутригодовое распределение стока р.Черек**

IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	Год
Средние месячные расходы воды, м <sup>3</sup> /с												
Средний по водности год												
15,0	29,9	72,5	114	114	58,6	23,9	15,9	12,5	10,8	10,3	9,85	40,8
Маловодный год Р~75%												
18,8	34,2	76,6	96,5	92,9	48,6	21,8	14,0	10,9	10,8	9,18	8,29	37,1
Маловодный год Р~95%												
16,7	30,3	65,9	84,2	85,3	43,7	19,2	11,9	9,22	8,83	7,68	6,53	32,6

Параметры кривой распределения вероятностей превышения максимальных расходов и расчётные расходы воды приведены в таблице 3.

**Таблица 3-Параметры кривой распределения вероятности превышения**

Створ	Параметры кривой распределения вероятности превышения			Расходы воды ( м <sup>3</sup> /с) различной вероятности превышения, Р%					
	Q <sub>ср.макс.</sub> , м <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	0,1	0,5	1	3	5	10
Кашхатау (Советская) ГЭС	202	0,26	4C <sub>v</sub>	459	392	364	319	309	271

При сбросе в русло реки Черек отработанный гидроэлектростанциями каскада Нижне-Черекских ГЭС воды не образуется «шлейф мутности», так как в гидроагрегаты поступает отстоянная вода, которая сбрасывается в реку с малой скоростью (кинетическую энергию воды забирают гидроагрегаты).

**Постановка задачи.** «Шлейф мутности» образуется при промыве отстойника головного узла Кашхатау ГЭС и при глубинном промыве головного узла Кашхатау ГЭС. Мутность смываемой с отстойника воды составляет 41 кг/м<sup>3</sup>.

Основная часть промывов отстойника проводится в летние 3 месяца. В этот период в средний по водности год средний сток реки Черек составляет 104 м<sup>3</sup>/с. Из них в деривацию забирается 65 м<sup>3</sup>/с, на промыв отстойника расходуется 15 м<sup>3</sup>/с воды, расход оставшейся в реке воды составляет 24 м<sup>3</sup>/с.

Использованная для промыва отстойника вода с повышенной мутностью перемешивается с оставшейся в реке водой и образуется общий сток 39 м<sup>3</sup>/с. При этом мутность воды снижается и составит в месте смешивания 15,8 кг/м<sup>3</sup>.

С учётом мутности самой воды в реке (примерно 0,2 кг/м<sup>3</sup>) мутность воды в нижнем бьефе при промывке отстойника составляет 16 кг/м<sup>3</sup>.

Среднегодовая продолжительность промыва отстойника составляет 210 часов (35 промывов по 6 часов каждая). Треть (33%) создающих мутность воды наносов имеют линейные размеры не более 0,2 мм, а фракции с размерами не более 2 мм составляют 95% от общей массы смываемых наносов.

Один раз в год в паводковый период проводится глубокий промыв наносов головного узла Кашхатау ГЭС средней продолжительностью 5 суток. Половина (50%) создающих мут-

ность воды наносов имеют линейные размеры не более 0,2 мм, а фракции с размерами не более 7 мм составляют 90% от общей массы смываемых наносов.

Во время проведения глубинного промыва наносов головного узла Кашхатау ГЭС гидростанции каскада не работают. Одновременно с глубинным промывом наносов головного узла Кашхатау ГЭС открываются затворы на плотине Аушигерской ГЭС и мутная вода «транзитом» проходит через резервный головной узел.

В связи с тем, что резервный головной узел заполнен наносами полностью, с него практически наносы не удаляются при глубоком промыве глубинным промывом наносов головного узла Кашхатау ГЭС.

Структура взвешенных наносов реки Черек представлен следующим гранулометрическим составом (табл.4):

**Таблица 4 - Состав взвешенных наносов р. Черек**

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
%	4,4	6,0	3,8	18,9	17,1	8,3	21,6	19,9

Исходя из стохастической природы турбулентности водных потоков и случайного характера процессов распространения взвешенных наносов, при разработке математической модели транспорта взвешенных наносов турбулентным потоком при промыве отстойника головного узла и при глубинном промыве головного узла Кашхатау ГЭС, был принят стохастический подход с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и закона Релея для распределения их максимумов [5, 8, 9, 12].

**Методы исследования.** Математическая модель распространения взвешенных наносов в реке Черек и алгоритм расчета расхода наносов в естественном деформируемом речном русле основаны на представлении о едином механизме движения придонных и взвешенных наносов как стохастическом процессе взаимодействия турбулентных возмущений водного потока с частицами грунта [1, 2, 3, 4, 11,15].

Осредненная в пределах взвешивающих возмущений эффективная скорость, определяющая вертикальный перенос взвешиваемых частиц грунта, определяется по формуле:

$$\overline{(v - \omega)_B} = \frac{\sigma_v f(x_3)}{1 - \Phi(x_3)} - \omega, \quad (1)$$

Средние значения вертикальных скоростей жидкости при положительном и отрицательном выбросах, определяем по формулам:

$$v_B^{-+} = \frac{\sigma_v f(x_3)}{1 - \Phi(x_3)}, \quad (2)$$

$$v_B^{--} = \frac{-\sigma_v f(x_3)}{\Phi(x_3)}, \quad (3)$$

Средняя частота и средняя длительность взвешивающих выбросов вертикальной скорости жидкости, определяем по следующим зависимостям:

$$v_B^{-l} = \sqrt{2\pi} v_B^{-l} f(x_3), \quad (4)$$

$$\tau_B^{-l} = \frac{1 - \Phi(x_3)}{\sqrt{2\pi} v_B^{-l} f(x_3)}, \quad (5)$$

Средняя частота пульсаций лагранжевой вертикальной скорости жидкости равна:

$$v_B^{-l} = \frac{V}{23h}; \quad (6)$$

Среднее расстояние вдоль потока между смежными взвешивающими возмущениями в придонной области:

$$L_B = \frac{\bar{v}_\Delta}{v_B^3}; \quad (7)$$

Средняя концентрация указанных возмущений над поверхностью русла:

$$\frac{1}{L_B} = \frac{\bar{v}_B^3}{\bar{v}_\Delta}; \quad (8)$$

Гидравлическую крупность частицы определяем по формуле В.Н. Гончарова[3]:

$$\omega = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2g(\rho_\Gamma - \rho)d}{1.75\rho}}; \quad (9)$$

где  $d$  – диаметр частиц грунта, м,  $\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_\Gamma$  – плотность материала частиц грунта,  $\rho_\Gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $\varphi$  – параметр турбулентности, зависит от крупности частиц грунта.

Дальность переноса донных и взвешенных наносов определяем по зависимостям:

$$\ell_{вз} = v_{вз} t_{вз} - \frac{(\rho_\Gamma + \rho/2)\omega^2}{g(\rho_\Gamma - \rho)} \ln \left[ 1 + \frac{g(\rho_\Gamma - \rho)}{(\rho_\Gamma + \rho/2)\omega^2} v_{вз} t_{вз} \right] \quad (10)$$

$$\ell_{дон} = \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} - \frac{(\rho_\Gamma + \rho/2)\omega^2}{g(\rho_\Gamma - \rho)} \ln \left[ 1 + \frac{g(\rho_\Gamma - \rho)}{(\rho_\Gamma + \rho/2)\omega^2} \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} \right], \quad (11)$$

Для практических расчетов взвешенных частиц формулу (10) можно использовать в виде:

$$\ell_{вз} = v_{вз} t_{вз} \quad (12)$$

В естественных речных руслах, вследствие изменения по ширине потока геометрии русла и, следовательно, гидравлических характеристик потока, а также гранулометрического состава русловых отложений, общий расход наносов определяют суммированием расходов отдельных струй по ширине потока:

$$G_T = \sum_{k=1}^{N_k} q_{T,k} b_k \quad (13)$$

$$\text{где} \quad q_{T,k} = q_{дон,k} + q_{вз,k} \quad (14)$$

$q_{T,k}, q_{дон,k}, q_{вз,k}$  – соответственно удельные расходы руслоформирующих, донных и взвешенных наносов,  $b_k$  – ширина  $k$ -й струи.

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

$$L = \frac{H}{v_B} v_{cp}, \quad (15)$$

где  $H$  – средняя глубина на участке длиной  $L$ ,  $v_B$  – гидравлическая крупность наносов,  $v_{cp}$  – средняя скорость течения воды.

Определяя предельную концентрацию взвешенных наносов над единицей площади дна в наносонесущем слое потока, как  $\rho_{NB} = N_B/L_B$ , а скорость переноса их, как  $v_{вз} = \ell_{вз}/t_{вз}$  с учетом параметров  $P_{вз}$  и  $d_{вз}$ , формулу для предельного расхода взвешенных наносов используем в виде:

$$q_{\text{вз}} = q_{\text{дон}} n_{\text{в}} \tau_{\text{в}} v_{\text{в}} \frac{P_{\text{вз}} d_{\text{вз}} \ell_{\text{вз}}}{P_{\text{д}} d_{\text{д}} \ell_{\text{дон}}}; \quad (16)$$

**Обсуждение результатов.** Разработка и выполнение программ на ЭВМ осуществляется в студии разработчика Microsoft Developer Studio (MDS) на алгоритмическом языке FortranPowerStation (стандарт языка Фортран-90) [7, 8, 10].

Разработанная математическая модель распространения взвешенных наносов в русле реки Черек реализована в программном комплексе Sediment Transport Cherek.

Массив охватывает следующий диапазон изменения гидравлических характеристик потока и русла (табл.5-8): [13-14]

1. Характеристики «шлейфа мутности» при промыве отстойника головного узла Кашхатау ГЭС: расход воды  $Q = 39 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем наносов  $V = 7\,400 \text{ м}^3$ , глубина потока  $h = 0,7 \text{ м}$ , ширина потока  $b = 30 \text{ м}$ , средняя скорость потока  $V = 1,9 \text{ м/с}$ , диаметр частиц наносов  $d = 0,002 \text{ м}$ , мутность воды  $\mu = 16 \text{ кг/м}^3$ .

В результате объемы загрязняемой воды, протекающей в шлейфах взвеси с концентрацией частиц наносов выше заданной, — «проточные объёмы» (ПО),  $\text{м}^3$  получаем в виде:

**Таблица 5 - Объемы загрязняемой воды**

Концентрация взвеси в воде, $\text{кг/м}^3$					
$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
518400	259200	103680	51840	25920	5184

Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной, представлено в таблице 6:

**Таблица 6 - Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков**

Операция	Концентрация взвеси в воде, $\text{кг/м}^3$					
	$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
L, м	52,1	104,2	260	521	1041,7	5208,3

**Таблица 7 - Время существования шлейфов взвеси с концентрацией выше заданной, час.**

Концентрация взвеси в воде, $\text{кг/м}^3$					
$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
0,076	0,15	0,38	0,76	1,15	1,76

**Таблица 8 - Площади дна ( $\text{м}^2$ ), покрываемые слоем отложений взвешенных веществ**

Толщина слоя осадков, м					
$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
1563	3126	7800	15630	31251	156249

2. Характеристики «шлейфа мутности» при глубинном промыве представлены в таблицах 9-12: расход воды  $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем наносов  $V = 7\,400 \text{ м}^3$ , глубина потока  $h = 0,9 \text{ м}$ , ширина потока  $b = 50 \text{ м}$ , средняя скорость потока  $V = 2,2 \text{ м/с}$ , диаметр частиц наносов  $d = 0,007 \text{ м}$ , мутность воды  $\mu = 10,6 \text{ кг/м}^3$ .

В результате объемы загрязняемой воды, протекающей в шлейфах взвеси с концентрацией частиц наносов выше заданной, — «проточные объёмы» (ПО),  $\text{м}^3$  получаем в виде показателей, представленных в таблицах 9-12.

**Таблица 9 - Объемы загрязняемой воды, протекающей в шлейфах взвеси с концентрацией частиц наносов выше заданной**

Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
381600	190800	76320	38160	19080	3816

**Таблица 10 - Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной**

Операция	Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
	≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
L, м	28	56	139	279	557	2786

**Таблица 11 - Время существования шлейфов взвеси с концентрацией выше заданной**

Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
0,03	0,07	0,2	0,35	0,7	1,35

**Таблица 12 - Площади дна (м<sup>2</sup>), покрываемые слоем отложений взвешенных веществ**

Толщина слоя осадков, м					
≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
1400	2800	6950	13950	27850	139300

**Вывод.** Посредством проведенного имитационного моделирования были получены сведения об объемах и площадях зон влияния повышенной мутности на водные биоресурсы реки Черек.

Произведена оценка ущерба водным биоресурсам от эксплуатации Нижне-Черекских ГЭС (Кашхатау, Аушигерской). Результаты проведенных исследований показали, что негативное влияние «шлейфа мутности» при однократном смыве селевых наносов [16-17] на одной электростанции, с учетом критических показателей концентрации взвешенных веществ в воде, будет проследиваться на протяжении почти 3 км в проточном объеме около 710 тыс. м<sup>3</sup>.

Размер вреда водным биоресурсам в натуральном выражении при этом составит около 1 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. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел// Журнал университета водных коммуникаций. – СПб, т.2, 2010. – С.90-93.
3. Гришин Н.Н. Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. – С.102-119.
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 М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – С.53-68.

7. Магомедова А.В., Гусейнова М.Р., Насибова Н.В. Разработка программного комплекса для расчета транспорта руслоформирующих наносов в речных руслах с использованием ГИС-технологий //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2009. – Т.15 – №4– С.147-157.
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. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2015. –Т.37, - №2 - С.84-91.
10. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.98-108.
11. Магомедова М.Р. Разработка программного комплекса для обработки многомерных данных движения руслоформирующих наносов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 15. – С. 1951–1955. – URL: <http://e-koncept.ru/2016/96309.htm>.
12. Магомедова М.Р. Программный комплекс для расчета расхода придонных наносов в речных руслах. А.с. 2013610555 Рос. Федерация, № 2013616724; заявл. 10.01.13; опубл. 17.06.13.
13. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С.127-130.
14. 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.
15. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, pp.251-258.
16. 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.
17. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.

#### References:

1. Alekseevskiy N.I. The formation and movement of river sediments. *Moscow: Moscow State University*. 1998, pp.95-114. (In Russian)
2. Baryshnikov N.B., Pagan A.O. Hydraulic resistance of river channels. *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij. St. Petersburg* [Journal of University of water communications] 2010, vol. 2, pp. 90-93. (In Russian)
3. Grishin N.N. The mechanics of the bottom sediment. *Moscow: Nauka*, 1982, pp.102-119. (In Russian)
4. Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Calculations of the flow bed load in rivers: a collection of papers on hydrology. *St. Petersburg: Gidrometeoizdat*, 2004, no. 27, pp.25-40. (In Russian)
5. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. *St. Petersburg: Nestor-Istoriya*, 2011, pp.103-107.
6. Magomedova M.R. Matematicheskoe modelirovanie dvizhenija pridonnyh nanosov v otkrytyh ruslah. [Mathematical modeling of the bottom sediment motion in open channels]. *Makhachkala: Aleph, M.A Ovchinnikov*, 2014, pp.53-68. (In Russian)
7. Magomedova A.V., Huseynova M.R, Nasibova N.V. Development of software for transport calculation river bed forming sediments in river beds using GIS technologies. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Herald of

- Daghestan State Technical University. Technical science.] 2009, vol.15, no.4, pp.147-157. (In Russian)
8. Magomedova A.V., Magomedova M.R. Factors that determine the process of river bed forming sediment transport. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Herald of Daghestan State Technical University. Technical science], 2013, vol.29, no.2, pp.58-64. (In Russian)
  9. Magomedova M.R. The practical application of the author's model of mineral particles transport. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Herald of Daghestan State Technical University. Technical science], 2015, vol.37, no.2, pp.84-91. (In Russian)
  10. Magomedova A.V. Jerozionnye processy v ruslah rek i kanalov. [Erosion processes in rivers and canals]. Moscow: VZPI, 1990, pp.98-108. (In Russian)
  11. Magomedova M.R. Development of software for processing of multidimensional data of river bed forming sediments movement. *Scientific and methodical electronic journal "Concept"*, 2016, vol.15, pp.1951-1955. URL:<http://ekoncept.ru/2016/96309.htm>. (In Russian)
  12. Magomedova M.R. Software for calculating the flow rate of bottom sediment in the river beds. AS 2013610555 R.Federation, number 2013616724; appl. 01/10/13; publ. 06.17.13. (In Russian)
  13. Rzhantsyn N.A. Rusloformirujushhie processy rek. [River bed forming processes]. *Leninograd: Gidrometeoizdat*, 1985, pp.127-130 (In Russian)
  14. 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.
  15. Benoit C., Magnus L. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, pp.251-258.
  16. 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.
  17. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.

#### **Сведения об авторах.**

**Григорьян Ольга Петровна** – заместитель директора по научной работе.

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

#### **Authors information.**

**Olga P. Grigoryan** – the Deputy Director on scientific work.

**Milada R. Magomedova**—candidate of technical Sciences, Dean of the faculty of oil, gas and environmental engineering, doctoral student in building structures and hydraulic structures of the Faculty of Architecture and Construction.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию** 01.06.2016.

**Received** 01.06.2016.

**Принята в печать** 10.08.2016.

**Accepted for publication** 10.08.2016.