

Для цитирования: Магомедова М.Р., Курбанова З.А., Шангереева Б.А. Компьютерное моделирование определения объемов заиления водохранилища на реке Аксай. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 102-112. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112.

For citation: M.R. Magomedova, Z.A. Kurbanova, B.A. Shangereeva. Computer simulation of determining siltation volumes of water reservoir storage on the Aksay river. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 102-112. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ АКСАЙ

Магомедова М.Р., Курбанова З.А., Шангереева Б.А.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка математической модели зон повышенной мутности реки Аксай для определения объемов заиления Аксайского водохранилища. **Метод.** 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» на реке Аксай. **Результат.** Вследствие многофакторного характера непрерывно связанных процессов заиления и занесения верхних бьефов гидроузла Аксайского водохранилища взвешенными и донными наносами, для обеспечения достоверности прогноза занесения, разработана математическая модель процесса занесения водохранилища с пространственной и временной увязкой с моделью процесса заиления, что реально осуществимо на базе компьютерного моделирования. **Вывод.** Разработанная модель, основанная на вероятностном подходе, с применением теории выбросов случайных процессов, в целом правильно отражает процесс транспорта наносов в открытых руслах. Разработка и выполнение программ моделирования осуществлялись в студии разработчика Microsoft Developer Studio (MDS) на алгоритмическом языке Fortran Power Station, который содержит не только систему программирования, но и объединенный в Microsoft Developer Studio (Мастерская разработчика) набор инструментов поддержки больших программных проектов.

Ключевые слова: мутность потока, водохранилище, моделирование, взвешенные наносы, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

COMPUTER SIMULATION OF DETERMINING SILTATION VOLUMES OF
WATER RESERVOIR STORAGE ON THE AKSAY RIVER

M.R. Magomedova, Z.A. Kurbanova, B.A. Shangereeva
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objectives. The development of a mathematical model for the increased turbidity zones of the Aksay river in order to determine the siltation volumes of the Aksay water reservoir storage. **Method.** The mathematical model is developed using the theory of probability and the theory of random process outliers. The model takes the normal distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities into account, as well as the Rayleigh law of the distribution of their maxima. The proposed model is used to calculate the “turbidity tail” of the Aksay river. **Result.** Due to the multifactorial nature of the continuously associated processes of siltation and deposition of suspended and bottom sediments in the upper pounds of the Aksay reservoir storage hydrological system, a mathematical model of the reservoir accretion process is developed. This model provides the reliability of accretion forecasting with spatial and temporal correlation with the siltation process model, which is actually feasible on the basis of computer simulation. **Conclusion.** The developed model, which is based on a probabilistic approach and the theory of random process outliers, reflects the overall process of sediment transport in open channels. The development and execution of simulation programmes is carried out using the Microsoft Developer Studio (MDS) and the Fortran Power Station algorithmic language, which comprises not only a programming system, but also a set of tools for supporting large software projects integrated into MDS.

Keywords: turbidity, reservoir storage, modelling, suspended sediment, particle size distribution, flow velocity, sediment flow rate, turbulent flow

Введение. Проблема борьбы с заилением и занесением водохранилищ значительно усложняет эксплуатацию гидроузлов и вызывает ряд неблагоприятных последствий: потерю регулирующей емкости водохранилища, занесение водозаборных отверстий, истирание турбин наносами и др., что приобретает в настоящее время большую актуальность и народнохозяйственную значимость. Образование наносов в водохранилищах имеет негативные экономические и экологические последствия.

Действующие методики расчета заиления водохранилищ являются упрощенными, которые не учитывают многофакторность процесса заиления.

Заиление водохранилищ и определения срока их службы является одним из основных и еще недостаточно разработанных вопросов гидрологии. Отсутствие достоверных данных стока взвешенных наносов и несовершенство методов прогноза заиления вынуждает проектировщиков учитывать наносы как некоторый процент от стока взвешенных, который колеблется в пределах от 20% до 300%.

Даже действующие «Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании» рекомендуют вычислять расход наносов по четырем формулам и контролировать вычисления подбором аналога.

В связи с этим оценка динамики заиления водохранилищ должна быть основана на гидродинамических уравнениях взвешенных водных масс и учитывать основные факторы, определяющие этот процесс. Достоверность прогноза деформации речных русел, прогноз опасных гидроэкологических процессов, заиления водохранилищ, а также решение других вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией гидротехнических сооружений зависит от точности расчета расхода наносов.

Математическое моделирование заиления водохранилищ, построенное на основе теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов позволяет не только оценивать динамику отметок дна при текущих гидродинамических условиях, но и давать прогнозы при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе, вызванного различными антропогенными мероприятиями; позволяет прогнозировать время и объемы накопления наносов на Аксайском водохранилище. Также при математическом моделировании имеется непрерывная взаимосвязь между изменением морфометрических характеристик котловины водохранилища и переменными состояниями водной массы.

Постановка задачи. 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 Аксай берёт начало из родников на северо-восточном склоне хребта Суяси-Меэр, на северном склоне Андийского хребта и впадает в р. Акташ на 37 – м км от устья. Полностью находится в пределах Дагестана. Четвертичный покров реки сложен самыми разнообразными по механическому составу породами: глинами, песчаными глинами, супесями, песками, лессовидными суглинками, галечниками и илисто-песчаными речными наносами. Какой-либо закономерности в залегании этих пород не наблюдается, ближе к рекам распространены глинисто-песчаные породы типа речных наносов, а в средней части низменности преобладают суглинистые грунты.

Водный режим реки Аксай характеризуется дождевыми летними паводками с максимальными расходами: 5% обеспеченности $Q = 368$ м³/с, 1 % обеспеченности $Q = 638$ м³/с. Среднегодовой расход обеспеченностью 50% составляет 6,94 м³/с, среднемноголетний объем стока – 218 млн.м³. После строительства канала Акташский тракт воды р. Акташ сбрасываются в р. Сулак в районе села Языковка. Длина составляет 144 км, площадь водосбора — 1390 км², средняя его высота — 444 м, средний уклон 14,5%, ширина реки изменяется от 5 до 25 м. Характер реки меняется с высотой — в верхнем течении она горная, а в низовьях становится равнинной. Река характеризуется паводочным режимом в тёплую часть года и низкой зимней меженью.

При высоких паводках мутность реки Аксай может граничить с мутностью селевых потоков (максимально наблюдаемая мутность – 106 кг/м³), среднегодовой объем твердого стока – 1280 тыс.м³ [1]. Показатели годового стока наносов и растворенных веществ в реке Аксай представлены в табл. 1.

Таблица 1. Годовой сток наносов и растворенных веществ в реке Аксай
Table 1. Annual runoff of sediment and solutes in the Aksai River

Взвешенных наносов, тыс. тонн Weighted sediment, thousand tons	Влекомых наносов, тыс. тонн Deposited sediment, thousand tons	Растворенных в воде веществ Substances dissolved in water	Модуль эрозии в год, т/км ² The erosion modulus per year, t / km ²
95	152	1558	2543

Состав взвешенных наносов р. Аксай характеризуется следующими значениями (табл.2):

Таблица 2. Состав взвешенных наносов р. Аксай
Table 2. Composition of suspended sediment p. Aksai

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
%	-	-	-	0,08	0,17	2,04	11,67	13,34

В таблице 3 представлена ведомость измеренных расходов воды на р. Аксай.

Таблица 3. Ведомость измеренных расходов воды

Table 3. Statement of measured water discharge

№ гидротвора No. of hydraulic ram	Состояние реки River condition	Уровень воды, м ВС Water level, m BS	Расход воды, м ³ /с Water consumption, m ³ / s	Площадь водного сече- ния, м ² Water section area, m ²	Скорость течения, м/с Speed, m / s		Ширина реки, м River width, m	Глубина, м Depth, m		Уклон водной поверхности средний, % Water slope surface average %
					средняя average	максимальная maximum		средняя average	максимальная maximum	
1	св.	95,83	2,87	5,04	0,57	0,81	17,40	0,29	0,51	0,78
1	св.	97,92	112,2	62,13	1,81	2,58	38,43	1,62	2,60	0,78
1	св.	96,23	9,1	11,12	0,82	1,17	22,80	0,49	0,91	0,78

В низовье реки построено Акташское водохранилище. Створ ГТС расположен в 150 км от истока реки, бассейн реки Аксай. Исследование за мертвым объемом водохранилища в течение 25-30 лет, показало, что в водохранилище будет оседать 90% всех наносов, влекомых рекой (порядка 1150 тыс. м³ в год).

В настоящее время аккумулирующая емкость водохранилища в результате заилиния значительно уменьшилось. Кроме того, ложе заросло растительностью. Отметки ложа водохранилища поднялись на 5-7 метров, возвышение гребня дамб над уровнями воды уменьшилось до минимума. Вследствие этих причин водохранилище своего предназначения (среза пика паводков) не выполняет.

Кроме того имеется угроза перелива через гребень дамб с прорывом вод реки и созданию аварийной ситуации. Затоплению подвержены Бабаюртовский и Хасавюртовский районы Республики Дагестан. Под угрозой затопления находятся населенные пункты Камыш-Кутан, Чагар-Отар, Тукита, Нарыш Кутан, селения Герменчик, Бабаюрт, кутаны животноводства [1].

Методы исследования. При проектировании и эксплуатации водохранилищ на реках с повышенным содержанием наносов приходится решать вопросы заилиния водохранилищ, а в ряде случаев намечать соответствующие меры по борьбе с этим явлением.

Существенное заилиние водохранилища влечет за собой потерю полезного объема и, как следствие, может привести, как к уменьшению диапазона регулирования объема и отметок верхнего бьефа, так и к отсутствию способности обеспечить водопотребителей расходами в требуемых количества, или способности поддерживать требуемые уровни нижнего бьефа. Проведенные исследования показывают, что ежегодные потери объема в результате заилиния составляют от 0,02% до 14%.

Существующие в настоящее время методы расчета заилиния водохранилищ, как правило, дают лишь общую оценку условно равномерного заполнения водохранилища речными наносами. Эти методы не учитывают сложную морфометрию водохранилищ, распределение поступившего с речным стоком твердого вещества по всей акватории водохранилища и его внутригодовую динамику, обусловленную изменением водности в течение года, регулированием стока водохранилища, влиянием ветра и ледовых явлений, осыпание берегов, образование органического осадка и так далее.

Случайный характер срыва и перемещения частиц грунта турбулентным потоком обусловлен воздействием мгновенных гидродинамических сил, зависящих от актуальных скоростей течения, являющихся случайными функциями времени. Сила, с которой водный поток воздействует на частицу, покоящуюся на дне потока, подвержена мгновенным изменениям, обусловленным пульсационным характером скоростей.

При расчете осаднения наносов в водохранилищах и отстойниках необходимо, кроме того, знание закона распределения концентрации наносов по глубине потока.

Сложный характер движения речных наносов и отсутствие единой теории движения обусловили многообразие методов расчета твердого расхода.

Исследование движения распространения взвешенных частиц 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 взвешенных наносов.

На основе анализа и обобщения данных натуральных измерений на реках предложено большое количество эмпирических формул для оценки транспортирующей способности потока в открытом русле.

В инженерной практике широко используются формулы, в которых средняя по сечению предельная концентрация взвешенных наносов в потоке представлена в виде функции гидравлических параметров потока и средней гидравлической крупности частиц, в ряде случаев с учетом гранулометрического состава взвешенных наносов, оцениваемого по эмпирическим функциям распределения гидравлической крупности.

Разнообразие методов определения расхода наносов и расхождение между ними при количественных расчетах обусловлено чрезвычайной сложностью процессов взаимодействия турбулентного потока с размываемым и транспортируемым материалом и связанной с этой сложностью учета всех определяющих факторов процесса, а также отсутствием единой теории движения руслоформирующих наносов – донных и взвешенных [2-5].

Вследствие случайного характера процессов срыва, взвешивания, транспорта и осаждения наносов в турбулентном потоке задача разработки достоверных моделей этих процессов, отвечающей физической сущности явления, а, следовательно, и усовершенствования методов расчета твердого расхода требует для своего решения привлечения методов теории вероятностей и теории случайных процессов.

Существующее состояние проблемы расчета объемов наносов, определение их расхода, когда отсутствуют даже нормативные документы по применению тех или иных методов в проектной практике, более надежные методы достаточно сложны, что вызывает необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета твердого расхода, а также разработки алгоритмов и программ. В этой связи является актуальной задача математического моделирования процесса движения наносов на ЭВМ для определения зон повышенной мутности реки Аксай.

Исследование взаимосвязи между объемом наносов и факторами, определяющими накопление и перенос наносов, установленными на основе теоретических, экспериментальных и натуральных исследований, является трудной задачей из-за сложности физической природы, стохастического характера и многофакторности процесса [3,15].

В естественных условиях, вследствие неупорядоченного расположения, а также различия размеров и форм, частицы несвязного грунта испытывают различное силовое воздействие со стороны потока: частицы, более возвышающиеся над соседними, испытывают большее усилие, менее возвышающиеся - меньшее.

В явлениях захвата зерен со дна для относительно крупных зерен устанавливается избирательное действие донных вихрей, состоящее в том, что крупные зерна наносов захватываются со дна и поднимаются движущимися у дна вихрями больших размеров, а меньшие по величине зерна захватываются вихрем, соответственно, меньших размеров.

В шероховатых руслах захват зерен со дна и подъем их осуществляется механизмом вихревых областей, образующихся в углублениях за выступами шероховатости дна.

Для частиц, крупнее толщины прилипшего слоя, известную роль играет явление подскокивания зерен, движущихся по дну, при встрече с выступами шероховатости дна. При достаточно больших скоростях своего движения зерна при встрече с выступами шероховатости могут не останавливаться, а подскокивать при ударе.

Между нижней гранью частицы и дном потока происходит движение жидкости за счет разности напоров между передней и тыловой гранями. Сдвиг одной из частиц на поверхности дна есть случайное событие, связанное со случайным мгновенным превышением сдвигающих сил над удерживающими. При массовом движении наносов горизонтальное перемещение частицы будет происходить и при опускании ее ниже уровня $y = \Delta$, вследствие участия в дви-

жении большинства частиц верхнего слоя, где Δ – средняя высота выступов шероховатости русла [2-4, 6].

С возникновением гряд движение наносов изменяется. На пологом верховом откосе оно остается таким же, как и при плоском дне, т. е. частицы грунта движутся скачкообразно с периодическими остановками. Дойдя до гребня гряды, часть из них (более крупные) скатывается вниз, и накапливаются на крутом низовом откосе гряды, наращивая его, в силу чего гребень гряды смещается по течению на некоторое расстояние. Часть частиц (более мелких) задерживается на гребне восходящими токами вихря, образовавшегося в результате отрыва потока за низовым откосом. Обратные горизонтальные токи этого вихря размывают подвалье гряды и наращивают смытыми частицами низовой откос гряды снизу [3, 7-9].

Влечение, перенос, скачкообразное движение и взвешивание частиц грунта водным потоком осуществляется системой мгновенных гидродинамических сил, которые являются случайными функциями горизонтальной и вертикальной мгновенных скоростей течения, в отношении которых используется экспериментально подтвержденная гипотеза о нормальном законе их распределения и Релеевском законе распределения их максимумов [3].

На рис. 1 показан график реализации процесса $P(t)$ длительностью t ; в момент t_m реализация имеет максимальную амплитуду (максимум максимумов) P_{max} .

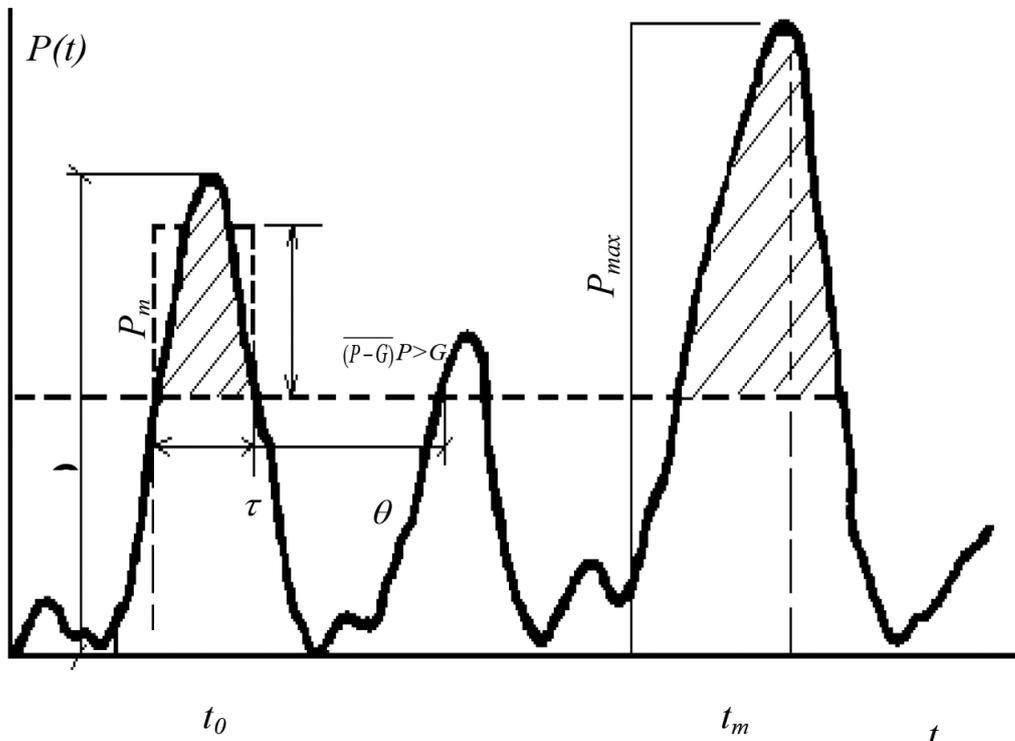


Рис. 1. Пересечение траекторией случайного процесса $P(t)$ критического уровня G
 Fig. 1. The intersection of the trajectory of a random process $P(t)$ critical level G

Прямая G – фиксированный уровень, пересекаемый несколько раз реализацией процесса $P(t)$. Пересечение случайным процессом уровня G снизу вверх – положительный выброс $P(t)$ за уровень G ; в момент времени t_0 происходит первый выброс.

В интервале $(0, t)$ реализация $P(t)$ имеет N выбросов. Число выбросов N , длительность положительных выбросов τ , интервал между выбросами, величина максимума P_m – являются характеристиками процесса $P(t)$, знание которых необходимо при решении задач связанных с транспортом придонных наносов [3].

Расход взвешенных наносов определяем по формуле:

$$q_{вз} = q_{дон} \eta_c \tau_c V_c \frac{P_{вз} d_{вз} \ell_{вз}}{P_0 d_0 \ell_{дон}}, \quad (1)$$

Для определения расхода донных наносов применяем формулу (2):

$$q_{дон} = \rho_{отл} d^2 \eta_c \tau_c V_c / t_{\Delta}, \quad (2)$$

где d – диаметр частиц грунта, м, $\rho_{отл} = \beta \rho_c$ – плотность русловых отложений, кг/м³, $\rho = 1000$ кг/м³, ρ_c – плотность материала частиц грунта, $\rho_c = 1800$ кг/м³, g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с², V_c – средняя частота срывающих турбулентных возмущений; τ_c – средняя длительность воздействия турбулентных возмущений на частицы грунта на дне; t_{Δ} – длительность срыва твердых частиц, с; η_c – вероятность срыва твердых частиц одним вихревым возмущением.

Для вычисления расхода наносов с учетом грядовой формы дна применяем формулу, полученную О.К. Карлыхановым и О.Б. Шевченко [10]:

$$q_T = \alpha \gamma c_r h_r, \quad (3)$$

где c_r – скорость перемещения гряды; h_r – высота гряды; α – коэффициент формы гряды, принимаемый большинством авторов в пределах 0,5-0,7; γ – объемный вес грунта в теле гряды. Сопоставление значений расходов, измеренных двумя способами на прямолинейном канале, показало, что они совпадают при $\alpha = 0,4$.

Общий расход наносов определяют суммированием расходов отдельных струй по ширине потока [11, 12]:

$$G_T = \sum_{k=1}^{N_k} q_{T,K} b_k \quad (4)$$

$$q_{T,K} = q_{дон,K} + q_{вз,K} \quad (5)$$

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

Дальность переноса донных и взвешенных наносов, определяем по зависимостям:

$$\ell_{вз} = V_{вз} t_{вз} - \frac{(\rho_{Г+} \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{Г} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{Г} - \rho)}{(\rho_{Г} + \rho / 2) \omega^2} V_{вз} t_{вз} \right] \quad (6)$$

$$\ell_{дон} = \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} - \frac{(\rho_{Г+} \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{Г} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{Г} - \rho)}{(\rho_{Г} + \rho / 2) \omega^2} \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} \right]. \quad (7)$$

Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков определяем по формуле:

$$L = G_T / w Q. \quad (8)$$

Среди существующих формул наиболее приемлемым для практического использования является способ выражения гидравлической крупности через стандартную гидравлическую крупность, предложенный В.Н. Гончаровым [12-13]:

$$w = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2g(\rho_2 - \rho)d}{1,75\rho}}, \quad (9)$$

где φ – параметр турбулентности, показывающий во сколько раз меньше действительная скорость падения в сравнении с той, которой обладали бы наносы при турбулентном режиме их падения.

Расчет параметра турбулентности φ в зависимости от температуры (5, 10, 15 и 20 градусов по Цельсию) принят по шкале, предложенной В.Н. Гончаровым.

Для численной реализации на ЭВМ, на языке Fortran PowerStation создан модуль Fall_parameter, входящий в программный комплекс. При $d > 1,5$ мм, $\varphi = 1$; в диапазоне 0,15 – 1,5 мм параметр турбулентности определяется по формуле :

$$\varphi = \frac{1}{\beta} \sqrt[3]{\frac{\rho\mu}{\rho_1 - \rho}} \sqrt{\frac{2g}{1,75\rho d}}; \quad (10)$$

для частиц $d < 0,15$ мм φ определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{33,8}{\sqrt{1,75\rho(\rho_1 - \rho)d^3}}. \quad (11)$$

где φ – параметр турбулентности, показывающий во сколько раз меньше действительная скорость падения в сравнении с той, которой обладали бы наносы при турбулентном режиме их падения.

С уменьшением крупности зерен значение φ возрастает, доходя при $d < 0,01$ мм до $\varphi = 300$.

Разработка и выполнение программ на ЭВМ осуществляется в студии разработчика Microsoft Developer Studio (MDS) на алгоритмическом языке FortranPowerStation.

Разработанная математическая модель определения объемов наносов в русле реки Аксай реализована в программном комплексе Sediment_Aksai.

Программный комплекс состоит из файлов головной программы Sediment_Aksai и подпрограмм с расширением f90.

Алгоритм расчета расхода наносов, включает определение следующих параметров:

1. Гидравлическая крупность.
2. Параметр турбулентности.
3. Допускаемая неразмывающая донная скорость потока.
4. Максимальный диаметр подвижных фракций грунта.
6. Выполняется расчет диаметра частиц, определяющего шероховатость русла при транспорте неоднородных по крупности наносов.
7. Выполняется расчет осредненной во времени донной скорости потока по формуле В.Н. Гончарова.
8. Определяется относительная донная скорость.
9. Определяется средняя гидравлическая крупность подвижных фракций.
10. Отбор массивов данных по критериям В.Н. Гончарова при образовании грядовых форм.
11. Отбор массивов данных по критериям Н.С. Знаменской при образовании грядовых форм.
13. Определение высоты гряд.
14. Определение глубины потока в средней части гряды.
16. Определение местной средней скорости потока в средней части донных гряд.
17. Расчет осредненной во времени фактической донной скорости потока.

18. Определение статистических характеристик транспорта наносов.
19. Определение относительного теоретического расхода наносов.
20. Определение массового расхода наносов.
21. Определение относительного расхода наносов.

Обсуждение результатов. Массив охватывает следующий диапазон изменения гидравлических характеристик потока и русла:

Расход воды $Q = 5,17 \text{ м}^3/\text{с}$, объем наносов $V = 7\,400 \text{ м}^3$, расход наносов $Q_n = 32,2 \text{ кг/с}$, глубина потока $h = 1,6 \text{ м}$, ширина потока $b = 38 \text{ м}$, средняя скорость потока $V = 1,8 \text{ м/с}$, диаметр частиц наносов $d = 0,003 \text{ м}$, мутность воды $\mu = 6,5 \text{ кг/м}^3$

В результате объемы наносов в русле реки составляют (табл. 4):

Таблица 4. Концентрация взвеси в воде
Table 4. Suspension concentration in Water

Показатели Indicators	Концентрация взвеси в воде, кг/м^3 Suspension concentration in water kg/m^3					
Мутность воды	$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
Объемы наносов	120978	60489	24195	12097	6048	1209

Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной, представлено в табл. 5:

Таблица 5. Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной
Table 5. The distance from the gauge site to the place of precipitation with a concentration of sediment particles above a given

Показатели Indicators	Концентрация взвеси в воде, кг/м^3 Suspension concentration in water kg/m^3					
Мутность воды	$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
Расстояние от створа гидроузла	333,3	666,6	1666,7	3333,5	6667	34300,5

Вывод. Посредством проведенного компьютерного моделирования были получены сведения об объемах, площадях зон влияния повышенной мутности, относительном содержании взвешиваемых фракций в грунте, средней частоте взвешивающих вихревых возмущений, вероятности взвешивания сорванных частиц, высоте подъема взвешенных наносов, длительности переноса частиц взвешенных наносов, удельных показателях расхода донных, взвешенных и общего расхода наносов на реке Аксай, что позволяет прогнозировать аккумуляционные характеристики заиления Аксайского водохранилища.

Библиографический список:

1. Сайпулаев И.М., Эльдаров Э.М. Водные ресурсы Дагестана: состояние и проблемы. Махачкала, 1996 г. С.19-30.
2. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
3. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. 137 с.
4. 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.
5. Vagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. pp. 303-312.
6. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т.37, №2. С.88-91.
7. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел // Журнал университета водных коммуникаций. СПб, т.2, 2010. С.90-93.
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, Vol. 5, pp. 774-792.

9. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 103–107.
10. Карлыханов О.К., Шевченко О.Б. Транспорт наносов в криволинейном русле // Гидротехническое строительство. 1991. № 7. С. 41– 43
11. 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.
12. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. М.: ВЗПИ, 1990. С.88-108.
13. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1954. 453 с.
14. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С.127-130.
15. 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.
16. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.

References:

1. Saypulayev I.M., El'darov E.M. Vodnyye resursy Dagestana: sostoyaniye i problemy. Makhachkala, 1996 g. S.19-30. [Saipulaev I.M., Eldarov E.M. Water resources of Dagestan: state and problems. Makhachkala, 1996, pp. 19-30. (In Russ)]
2. Alekseyevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'yefa // Me-teorologiya i gidrologiya. 1990. № 9, s. 100-105. [Alekseevsky N.I. Transport of sediment load with the developed structure of the channel relief // Meteorology and hydrology. 1990. No. 9, pp. 100-105. (In Russ)]
3. Magomedova M.R. Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014. 137 s. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014.137 p. (In Russ)]
4. 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. [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. (In Russ)]
5. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. P. 303-312. [Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. pp. 303-312. (In Russ)]
6. Magomedova M.R. Prakticheskoye primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2015. T.37, №2 S.88-91. [Magomedova M.R. The practical application of the author's model of transport of mineral particles // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2015. Vol. 37, No. 2 pp.88-91. (In Russ)]
7. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Gidravlicheskoye soprotivleniye rechnykh rusel// Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. SPb, t.2 , 2010. S.90-93. [Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Hydraulic resistance of river channels // Journal of the University of Water Communications. St. Petersburg, Vol. 2, 2010. S.90-93. (In Russ)]
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, vol. 5, P. 774-792. [By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, Vol. 5, pp. 774-792. (In Russ)]
9. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nyye issledovaniya i gidravlicheskoye modelirovaniye rechnykh potokov i ruslovogo protsesssa. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011. S. 103–107. [Klavin A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. pp. 103–107. (In Russ)]
10. Karlykhanov O.K., Shevchenko O.B. Transport nanosov v krivolineynom rusle // Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo. 1991. № 7. S. 41– 43. [Karlykhanov O.K., Shevchenko O.B. Sediment transport in a curved channel // Hydrotechnical construction. 1991. No. 7. pp. 41–43(In Russ)]
11. Grigor'yany O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoye matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2016. T.42, №3. S.106-109. [Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the distribution of suspended particles to determine areas of high turbidity in assessing damage to the aquatic biological resources of the Cherek River // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2016. Vol. 42, No. 3. pp.106-109. (In Russ)]
12. Magomedova A.V. Eroziionnyye protsessy v ruslakh rek i kanalov. M.: VZPI, 1990. S.88-108. [Magomedova A.V. Erosion processes in riverbeds and canals. M.: VZPI, 1990. pp.88-108. (In Russ)]
13. Goncharov V.N. Osnovy dinamiki ruslovykh potokov. L.: Gidrometeozdat, 1954. 453 s. [Goncharov V.N. Fundamentals of the dynamics of channel flows. L.: Gidrometeozdat, 1954.453 p. (In Russ)]
14. Rzhantsyn N.A. Rusloformiruyushchiye protsessy rek. L.: Gidrometeozdat, 1985. S.127-130. [Rzhantsyn N.A. River-forming processes of rivers. L.: Gidrometeozdat, 1985. pp.127-130. (In Russ)]

15. 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.
16. Benoit C., Magnus L. A. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, pp. 251-258.

Сведения об авторах:

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

Курбанова Зухра Адамовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра мелиорации, землеустройства и кадастров; e-mail: adamovna05@mail.ru

Шангереева Бийке Алиевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: biyke@mail.ru

Information about authors:

Milada R. Magomedova, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Oil, Gas and Environmental Engineering.

Zuhra A. Kurbanova, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Land Reclamation, Land Management and Cadastres; e-mail: adamovna05@mail.ru

Biyke A. Shangereeva, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: biyke@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.10.2019.

Принята в печать 20.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.10.2019.

Accepted for publication 20.11.2019.