УДК 551.46.06 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-69-78

КОНТРОЛЬ БАЛАНСА НАНОСОВ НА УЧАСТКЕ МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ И ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ СКВОЗНЫХ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА БЕРЕГ

А.Е. Щодро[1], А.Н. Сорокин[2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: alexeugn@ya.ru
[2]2198 НИЦ МО Российской Федерации, г. Севастополь
vip.parfyan@mail.ru

Представлены некоторые методические основы расчётов притока наносов к пляжному берегу, внутреннего баланса наносов на определённом его участке, изменения его конфигурации во времени и динамики береговой линии. Методика определения расхода наносов, поступающих из открытого моря, основана на работах Леонтьева И.О., в которых учитываются морфологические свойства берега и другие реальные условия. Расходы наносов связываются с вероятностями сдвига отдельных частиц с поверхности грунта.
Ключевые слова: контроль береговых деформаций, вероятность отрыва частицы, расход наносов, донная скорость

Поступила в редакцию: 15.08.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Очень актуальной является в настоящее время тема динамики морских берегов и пляжей, связанной тесно с изменением климатических условий, активизации геоморфологических процессов и учащением природных катаклизмов. Для разработки системы получения оперативной информации излагаются некоторые теоретические концепции. Подготавливается объект, где производится попытка искусственными мероприятиями уменьшить энергию волновых возмущений, воздействующих на берег, и привлечь наносы к пляжной территории. На этом же объекте собираются данные по накоплению наносов. Такая идея была уже высказана в работе [1].

Цель работы:

- разработка системы оценочных измерений для постоянного сбора и накопления информации по кинематике придонных течений ветроволнового потока, плотностях, расходах наносов, направлении их движения. Дальнейшее их накопление, обобщение и разработка предложений по контролю за динамикой пляжей;
- приспособление как теоретического аппарата, изучающего расходы при донных наносах, так и методов измерения, применяемых к условиям ветроволнового потока прибрежной области;
- подготовка данных для апробации этой системы на конкретном натурном объекте.

Основы связи придонных скоростей и придонных касательных напряжений с вероятностью сдвига частицы. Идеи Эйнштейна Х.А. [2, 3], развивались Гришаниным К.В. [2], давшим подробное описание теоретических разработок Эйнштейна Х.А. со своими комментариями. Идеи Эйнштейна Х.А. и Гришанина К.В. развивались и разрабатывались также в Институте гидромеханики АН Украины: авторы Розовский И.Л., Базилевич В.А. разработали систему зависимостей для определения расхода наносов через табличные значения некоторых специальных функций (интегралов вероятности, функции ошибок).

Эйнштейном Х.А. [3] установлена связь между кинематикой потока и вероятностью сдвига частиц, лежащих на дне. На основании этой связи разработа-

ны эмпирические формулы, позволяющие определять удельный расход наносов. Так, для произвольного (необязательно равномерного) или квазиравномерного потока Эйнштейном получена теоретическая формула:

$$P = 1 - 0{,}5\left[\operatorname{erf}\left(\frac{T-1}{0{,}5}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-T-1}{0{,}5}\right)\right], \quad (1)$$

где P – вероятность отрыва наносной частицы со дна; $T = 2\left(\frac{U_0}{U}\right)^2 = \frac{\tau_{крит}}{\tau}$ – отношение критических напряжений на дне $\tau_{крит}$ к реальному напряжению τ в заданной точке дна; выражается также как отношение квадратов скоростей – критической U_0 и реальной U (придонная динамическая скорость для русла); erf(x) – стандартизированная табличная функция ошибок

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (2)$$

Для квазиравномерного потока могут быть приняты соотношения

$$\tau_{крит} = \rho U_0^2, \; U_0 = 0{,}189\sqrt{\rho' g d_{сер}},$$

где ρ' – относительная плотность грунтовых частиц $\rho' = \frac{\rho_ч - \rho_0}{\rho_0}$.

Одно из эмпирических соотношений Эйнштейна Х.А. для удельного расхода i-ой фракции наносов в квазиравномерном потоке имеет вид:

$$q_i^{/} = 2{,}17\rho_1\omega\exp(-0{,}39\psi),$$

где ρ_1 – плотность частицы. Оно связывает расход наносов с параметром подвижности наносов $\psi = \frac{d}{HI}$, который зависит, в свою очередь, от вероятности их сдвига.

U^2 – квадрат динамической скорости для русла

$$U^2 = \frac{\tau}{\rho} = gHJ, \quad (3)$$

где τ – касательные напряжения на поверхности дна русла; J и H – продольный уклон и глубина русла;

U_0 – критическая динамическая скорость, то есть начальная скорость, при которой происходят первые движения грунтовых частиц в русле.

Расходы наносов разнозернистого грунта q_H по отдельным фракциям вычисляются путем пропорционального разделения общего расхода, найденного по среднему диаметру,

$$q_{Hi} = \frac{q_i}{\sum q_i} q_i', \quad (4)$$

где i – номер фракции грунтовой смеси.

w – гидравлическая крупность наносов, которая для частиц размером более полутора миллиметров определяется по формуле

$$w = \sqrt{\frac{0{,}75\rho' g d}{C_x}}, \quad (5)$$

где C_x = 1,17 – коэффициент обтекания грунтовой частицы при ее свободном падении в неограниченной водной среде.

Процесс деформации несвязного грунта осуществляется путем отрыва и выноса отдельных его частиц, лежащих на поверхности, а также путем смыва слоя частиц толщиной, измеряемой одним – двумя или несколькими их средними диаметрами. Такая потеря устойчивости одного слоя частиц происходит обычно при наличии относительно однородного по крупности грунта и связана с нарушением баланса сдвигающих и удерживающих сил, действующих по контакту сдвигаемого слоя с более глубоко залегающими слоями частиц. Такие процессы сдвига и выноса грунта характерны для однородных грунтов. Формирующийся при деформации грунта расход наносов связан, безусловно, с веро-

ятностью сдвига отдельной частицы; и эта связь, в общих чертах, нами установлена. Именно определение вероятности отрыва становится главной задачей, так как в разных условиях волнения на море и наката на берег легче исходить из нагрузок, действующих на отдельные частицы. Этой цели могут прекрасно служить работы, посвященные основам теории отрыва отдельной частицы.

Необходимость измерения расходов наносов в том случае, если при массовом сдвиге твёрдых частиц значения вероятностей сдвига будут в действительности искажены, то есть будут не соответствовать теории, результаты определения функции касательных напряжений очень чёткие, но позволяют также вести их коррекцию через коррекцию значений касательных напряжений.

Определение вероятности сдвига одиночной частицы методом имитационного моделирования. К вероятности сдвига отдельной частицы подойдём с другой стороны. В работах [4, 5] развита теория, которая позволяет оценить вероятность сдвига частицы непосредственно из динамических факторов, влияющих на саму частицу. В дальнейшем рассматриваются условия нарушения равновесия отдельной частицы на поверхности дна. Основными факторами, определяющими условия отрыва такой частицы от дна, являются действующие на нее внешние нагрузки, а также силы инерции, связанные с ускорением частицы в начальный период ее движения. В качестве внешних нагрузок рассматриваются силы собственного веса, взвешивающая архимедова сила, а также гидродинамическая сила взаимодействия турбулентного потока с неподвижной частицей. Для частиц крупностью меньше 1,5 мм могут быть учтены также молекулярные силы, удерживающие частицу от сдвига и отрыва.

Рассматриваются три возможных варианта отрыва частицы от дна. Первый – вертикальный отрыв, когда сумма вертикальных подъемных сил, действующих на частицу, становится больше суммы сил тяжести и вертикальной составляющей силы трения $Fy(t) >= 0$. Второй – вращения частицы вокруг точки O1 и ее отрыв от точки соприкосновения в момент, когда реакция сопротивления $R(t) <= 0$ становится равной нулю. Третий вариант – перекатывание донной частицы через соседнюю частицу и дальнейшее ее движение в форме перекатывания. Из проведенных ранее расчётов следует, что наиболее частым является именно третий вариант.

Вероятности выброса частиц определяются путем решения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих начальную стадию их движения. При этом частица считается оторвавшейся от дна, если время отрыва меньше или равно времени воздействия. На рис. 1 представлена схема силовых воздействий на одиночную шарообразную частицу, лежащую на поверхности дна и обтекаемую потоком. Нормальные и касательные силы, действующие на частицу, распределены неравномерно. Замеры силовых нагрузок производились также в работе [6].

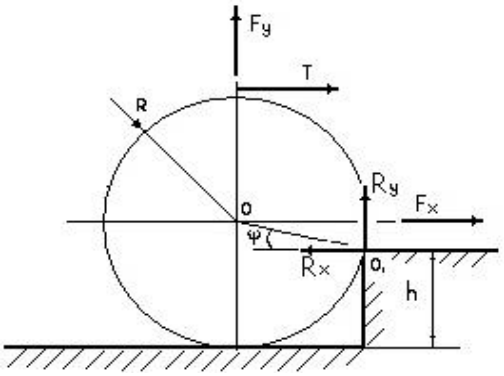


Рис. 1. Силы, действующие на одиночную шарообразную частицу
Fig. 1. Forces acting on a single spherical particle

Результирующая нормальных сил P воздействия потока на частицу может быть выражена интегралом по поверхности частицы:

$$P = \int_s p ds , \qquad (6)$$

где ds – элементарная поверхность частицы.

Горизонтальную и вертикальную составляющие силы P обозначим P_x и P_y.

Пусть $G = 3/4\,\pi\rho_4 g R^3$, $F_{apx} = 3/4\,\pi\rho g R^3$ – сила собственного веса и архимедова сила соответственно, $T = -\int_s \mu \frac{\partial u}{\partial n} ds$ – результирующая сила касательных напряжений.

Уравнения начального движения частицы. Для системы координат, обозначенной на рис. 1, запишем уравнение динамического равновесия частиц с учетом сил инерции, включаемых по принципу Д'Аламбера в систему уравновешенных сил

$$m \cdot \ddot{x}_0 = F_x(t), \qquad (7)$$

$$m \cdot \ddot{y}_0 = F_y(t), \qquad (8)$$

$$x_c(x,y)\big|_{t=0} = x_0 ,\ y_c(x,y)\big|_{t=0} = y_0 , \qquad (9)$$

$$x'_c\big|_{t=0} = 0 ,\ y'_c\big|_{t=0} = 0 , \qquad (10)$$

$$\varphi''_t = \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{n} M_i(t), \qquad (11)$$

$$\varphi\big|_{t=0} = \varphi_0 ;\ \varphi''_t\big|_{t=0} = 0 , \qquad (12)$$

где x_c, y_c – координаты центра масс частицы, $m = \left(\rho_4 + \frac{\rho}{2}\right) 3/4\,\pi R^3$ – масса частицы с учетом присоединенной массы воды, x_0, y_0, φ_0 – декартовы координаты центра масс и его начальная угловая координата в момент времени t=0; F_x, F_y – проекции равнодействующих всех действующих сил на оси OX и OY соответственно; I – момент инерции шарообразной частицы относительно оси, проходящей через точку касания О.

Момент инерции определяется для центральной оси шарообразного тела следующим образом $I = \iint_v r^2 dm = \pi\rho_4 R^5$.

Применяя теорему Штейнера о переносе оси, получим выражение для момента инерции относительно оси, проходящей через точку O_1

$$I = \frac{28}{15}\pi\rho_4 R^5 .$$

Уравнения (7)–(12) выражают второй закон Ньютона для начального момента движения частицы. Причем уравнение (11) характеризует вращательное движение частицы вокруг оси О.

Таблица 1. Значения критических скоростей выкатывания или отрыва шарообразных частиц при $h_{уст}/D$ = 1/3 и синусоидальном характере изменения придонной скорости частицы $V(t) = V+Ksg\cdot 10\pi t$ [4, 5]

D, м	V_o, м/с при Ksg, равном		
	0,1	0,2	0,3
0,0002	0,078	0,064	0,056
0,001	0,176	0,147	0,126
0,002	0,249	0,208	0,178
0,0025	0,279	0,232	0,201
0,005	0,399	0,335	0,289
0,01	0,571	0,485	0,42
0,03	1,05	0,876	0,767
0,05	1,343	1,16	1,02
0,075	1,656	1,453	1,281
0,1	1,932	1,704	1,507
0,125	2,177	1,928	1,708
0,15	2,4	2,132	1,891
0,2	2,797	2,496	2,218

Примечание. Значения V_o получены расчетом по приведенной методике без привлечения метода статистической имитации изменения скоростей и свойств грунта.

Система наблюдений включает геодезические замеры отметок отмели в зоне накопления наносов, а также во всех участках занесения и заиления водных пространств на прибрежных территориях; замеры скоростей движения переменных во времени донных токов, их насыщенность наносами, характера движения и траектории придонных частиц, их концентраций и направления движения.

Расчёт деформации дна в пределах пляжной отмели и самого пляжа. В качестве базового уравнения расчета плановых деформаций принято двухмерное уравнение баланса наносов, которое устанавливает связь между

изменениями поверхности пляжа и транспортировкой наносов и может быть записано в виде:

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\partial q_{x1}}{\partial x_1} + \frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\partial q_{x2}}{\partial x_2} = 0, \quad (13)$$

где z_0 – отметки поверхности дна речного русла; q_{x1}, q_{x2} – составляющие вектора удельного расхода русловых наносов; ε – коэффициент пористости донных отложений; x_1, x_2 – продольная и поперечные координаты.

Данное уравнение представляет собой нелинейное уравнение первого порядка гиперболического типа. Его решение удобно производить одним из известных численных методов.

Подготовка данных для апробации этой системы на конкретном натурном объекте. Вблизи г. Калининграда, в прибрежной зоне, была установлена система продольных волногасящих сквозных сооружений типа «Гребёнка», описанных в работе [7].

Описание объекта участка побережья моря вблизи г. Светловодска Калининградской обл.: уклон дна и конфигурация пляжа соответствует классическому профилю, описанному в работе [8] для аналогичных балтийских берегов. Ряд гребёнок установлен на расстоянии 35–40 м от уреза воды; использованы трубы стекло-базальтопластиковые диаметром 25 см, с расстоянием между ними 25 см. Глубина моря в месте установки гребёнок 2,2 м. За период с 2021 по 2022 гг. отложения наносов в центре участка между береговой линией и линией сооружений выросло по высоте от нуля до 1 м при общей длине трёх секций гребёнки 30 м, ширина зоны занесения песком берега составляет около 80 м.

По результатам наблюдений, проводившихся в течение двух лет, уже можно сделать выводы: первый – это систематический намыв песчаного материала на пляжную отмель напротив системы сооружений (рис. 2 а, б); второй – хорошая степень волногашения, что подтверждается фотографиями на рис. 3 а, б;

Перспективы дальнейшего развития основных идей данной работы. В работе [9] оценка размывающей способности потока, а, следовательно, и вероятности сдвига частицы, даётся по такой кинематической характеристике потока, как придонная актуальная скорость однопроцентной обеспеченности. Для волнового потока едва ли может быть применён такой способ.

Работы [8, 10, 11] служат основой для расчёта и прогноза деформации берега и эволюции береговой линии на длительные промежутки времени, измеряемые десятилетиями. Сбор информации, который можно проводить в рамках разрабатываемой концепции, может служить дополнением и уточнением тех прогнозов, которые могут даваться на основе этих работ. Работы [12–15] представляют собой различные модели двухфазных потоков не очень высокой концентрации, которые различным образом задают соотношение дефицита скорости насосных частиц по сравнению со скоростью частицы воды в тех же точках, где находятся сами частицы для разных по крупности частиц. Для выбора наиболее правильной математической модели двухфазного потока могут помочь данные измерения скорости двухфазных потоков (воды и наносов, переносимых в условиях волнового потока) средней концентрации. В зависимости от инерционности частиц будет зависеть их ускорение, которое можно фиксировать измерительными средствами (PIV-методом [1]). В работе [16] даётся физически понятная методика расчёта размывов с учётом взаимодействия наносов малой и средней концентрации, взаимодействующих с потоком и между собою. Фрагментарное применение такой модели для корректировки, исправления расчетов, выполняемых по другим моделям, могут уточнить модель взаимодействия потока и наносов для оценочных измерений насыщенности потоков и прогнозов.

Осуществление измерений в шторм представляет собой проблему, поэтому измерения целесообразно проводить при относительно слабом волнении, а затем каким-то образом обобщать результаты на случаи более мощных штормов.

а) б)

Рис. 2 а, б. Замыв участка пляжа напротив установленных гребёнок
Fig. 2 a, b. Washing out a section of the beach opposite the installed combs

а) б)

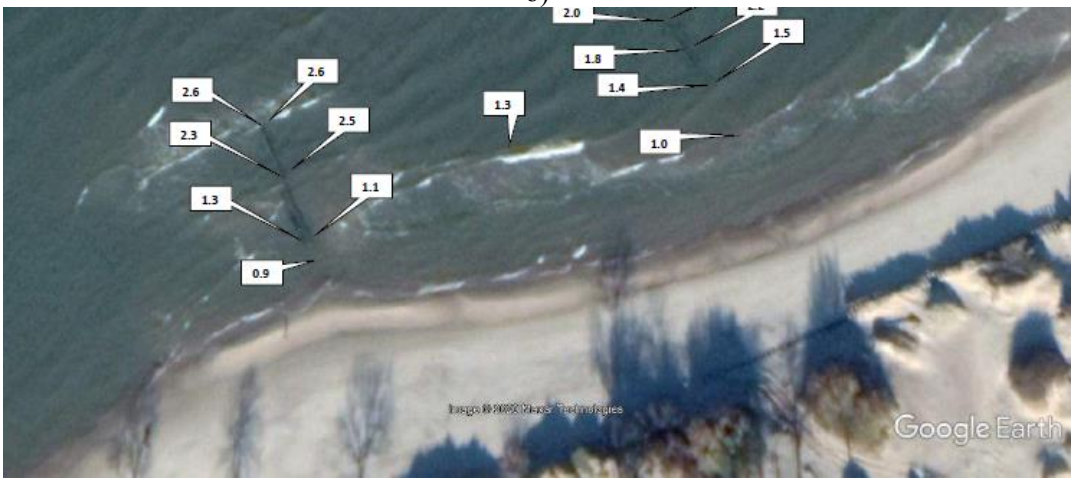
Рис. 3 а, б. Эффективность волногашения установленными сооружениями
Fig. 3a, b. Efficiency of wave damping by installed facilities

а) б)

Рис. 4 а, б. Замеры параметров наносных отложений на пляжной территории
Fig. 4 a, b. Measurements of the parameters of alluvial deposits on the beach area

а)

б)



в)

Рис. 5 а, б, в. Участки береговых отложений с отмеченными значениями глубин в метрах
Fig. 5 a, b, **c**. Areas of coastal sediments with marked depth values in meters

Заключение. Приведённые теоретические концепции расхода наносов, в зависимости от кинематических характеристик ветроволнового потока, в сочетании с приводимыми методиками натурных измерений, позволили создать основу для долговременного или оперативного сбора информация о поступающих наносах, изменения их расхода в зависимости от волновой обстановки в данном регионе, долгосрочных изменений во времени с целью разработки долговременных прогнозов динамики побережья в данном месте. Использование продольных волноломов в качестве берегозащитных систем показало их эффективность, хорошую степень волнозащиты, волногашения и значительную заносимость пляжной зоны за установленными сооружениями данного типа.

Информация на рис. 4 и 5 имеет оценочное значение. Это, к сожалению, пока что не законченное исследование, но начальные результаты свидетельствуют о хорошей заносимости пространства между берегом и сооружениями в условиях штормов слабой и средней силы.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС № 0012-2021-0007 и № 0012-2021-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антоненков Д.А., Щодро А.Е.* Контроль и методика моделирования гидрологических процессов при проектировании гидротехнических сооружений в устьевых взморьях рек // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 55–62.

2. *Гришанин К.В*. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 311 с.

3. *Einstein Hans Albert.* Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport in Rivers // Journal of Hydraulic Engineering. 2004. Vol. 130 (6). P. 477–487.

4. *Schodro A.E.* Mathematical modeling of the single bottom particle stability // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник НТУ. 2004. Вып. 71. С. 206–215.

5. *Antonenkov D.A., Shchodro A.E.* Using the PIV Method to Study the Structure of the Water Flow and Bottom Sediment Transport Process // Oceanology. 2021. Vol. 61 (6). P. 1064–1071.

6. *Мацея А.В*. Взаимодействие турбулентного потока с шероховатым дном. Вопросы теории и практики надёжности гидромелиоративных систем и сооружений. Тбилиси: ГрузНИИГиМ., 1989. С. 106–112.

7. *Щодро А.Е., Сорокин А.Н.* Принципы управления движением наносов с помощью проницаемых волногасящих сооружений с гибкими элементами // Опасные явления – III: III Междунар. науч. конф. на базе ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г.). С. 213–217.

8. *Леонтьев И.О.* Бюджет наносов и прогноз развития морского берега // Океанология. 2008. Т. 48 (3). С. 467–476.

9. *Базилевич В.А*. Определение размывающей способности потока по актуальным скоростям // Гидротехническое строительство. 1962. № 8. С. 39–40.

10. *Леонтьев И.О*. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: GEOS, 2001. 272 с.

11. *Леонтьев И.О.* Равновесие берегового контура // Океанология. 2005. Т. 45 (5). С. 790–800.

12. *Гришин Н.Н.* Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.

13. *Баренблатт Г.И.* О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. 1953. Т. 17 (3). С. 261–274.

14. *Франкль Ф.И.* Опыт полуэмпирической теории движения взвешенных наносов в неравномерном потоке. Избранные труды по газовой динамике. М.: Наука, 1973. С. 664–669.

15. *Славінська О.С.* Гідродинамічний опис структури придонної області турбулентного потоку з урахуванням кореляцій руху часток наносів // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. 2006. Вип. 31. С. 278–286.

16. *Савенко В.Я., Славинська О.С., Щодро О.Є.* Методика розрахунку загальних руслових деформацій біля струмененапрямних дамб та мостових переходів: МРР 218–02070915–231–2004, Киев: Укравтодор: НТУ, 2004. 83 с. (Нормативний документ Укравтодор).

SEDIMENT BALANCE CONTROL IN THE SEA COAST SECTION AND INFLUENCE OF THE WORK OF THROUGH SHORE PROTECTION CONSTRUCTIONS ON THE COAST

A.E. Shchodro[1], A.N. Sorokin[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]198 SRC MD of RF, Sevastopol

Some methodological bases for calculating the sediment inflow to the beach coast, the internal balance of sediments in a certain area, changes in its configuration over time, and coastline dynamics are presented. The method for determining the discharge of sediments coming from the open sea is based on the works of Leontiev I.O., which consider morphological properties of the coast and other real conditions. Sediment flow rates are associated with the probabilities of particle separation from the bottom surface.
Keywords: control of bank deformations, probability of particle separation, sediment flow, bottom velocity

REFERENCES

1. *Antonenkov D.A.and Shchodro A.Ye.* Kontrol' i metodika modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov pri proyektirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v ust'yevykh vzmor'yakh rek (Control and methodology for modeling hydrological processes in the design of hydrotechnical structures in the estuarine coastal areas of rivers). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 55–62.

2. *Grishanin K.V.* Dinamika ruslovykh potokov (Dynamics of river-bed flows). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 311 p.

3. *Einstein Hans Albert.* Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport in Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, Vol. 130 (6), pp. 477–487.

4. *Schodro A.E.* Mathematical modeling of the single bottom particle stability. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*, Iss. 2004, 71, pp. 206–215.

5. *Antonenkov D.A, and Shchodro A.E.* Using the PIV Method to Study the Structure of the Water Flow and Bottom Sediment Transport Process. *Oceanology*, 2021, Vol. 61 (6), pp. 1064–1071.

6. *Matseya A.V.* Vzaimodeystviye turbulentnogo potoka s sherokhovatym dnom (Interaction of a turbulent flow with a rough bottom). *Voprosy teorii i praktiki nadozhnosti gidromeliorativnykh sistem i sooruzheniy*. Tbilisi: GruzNIIGiM, 1989, pp. 106–112.

7. *Shchodro A.Ye. and Sorokin A.N* Printsipy upravleniya dvizheniyem nanosov s pomoshch'yu pronitsayemykh volnogasyashchikh sooruzheniy s gibkimi elementami (Principles of control of sediment movement using permeable wave damping structures with flexible elements). III Mezh-dunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Opasnyye yavleniya – III", na baze Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, Rostov-na-Donu, 15-19 iyunya 2021, pp. 213–217.

8. *Leont'yev I.O.* Byudzhet nanosov i prognoz razvitiya morskogo berega (Sediment budget and seashore development forecast). *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48 (30), pp. 467–476.

9. *Bazilevich V.A.* Opredeleniye razmyvayushchey sposobnosti potoka po aktual'nym skorostyam (Determination of the erosive capacity of a current by actual speeds). *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, 1962, No. 8, pp. 39–40.

10. *Leont'yev I.O.* Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov (Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows). Moscow: GEOS, 2001, 272 p.

11. *Leont'yev I.O*. Ravnovesiye beregovogo kontura (Equilibrium of the coastal contou). *Okeanologiya*, 2005, Vol. 45 (5), pp.790–800.

12. *Grishin N.N.* Mekhanika pridonnykh nanosov (Mechanics of bottom sediments). Moscow: Nauka, 1982, 160 p.

13. *Barenblatt G.I.* O dvizhenii vzveshennykh chastits v turbulentnom potoke (On the Motion of Suspended Particles in a Turbulent Flow). *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1953, Vol. 17 (3), pp. 261–274.

14. *Frankl' F.I.* Opyt poluempi-richeskoy teorii dvizheniya vzveshennykh nanosov v neravnomernom potoke. (Experience of the semi-empirical theory of the movement of suspended sediments in an irregular flow). Izbrannyye trudy po gazovoy dinamike. Moscow: Nauka, 1973, pp. 664–669.

15. *Slavins'ka O.S.* Hidrodynamichnyy opys struktury prydonnoyi oblasti turbulentnoho potoku z urakhuvannyam korelyatsiy rukhu chastok nanosiv (Hydrodynamic description of the structure of the bottom region of the turbulent flow taking into account the correlations of the movement of sediment particles). *Hidromelioratsiya ta hidrotekhnichne budivnytstvo*, 2006, Vol. 31, pp. 278–286.

16. *Savenko V.YA., Slavyns'ka O.S., and Shchodro O.Ye.* Metodyka rozrakhunku zahal′nykh ruslovykh deformatsiy bilya strumenenapryamnykh damb ta mostovykh perekhodiv: MRR 218–02070915–231–2004 (Methodology for calculating general channel deformations near jet-directing dams and bridge crossings: MRR 218–02070915–231–2004). Kiev: Ukravtodor: NTU, 2004, 83 p.