

УДК 519.6

© И. И. Ковтун¹, Е. А. Проценко², А. И. Сухинов², А. Е. Чистяков³

¹Центр научно-технических услуг в области рыбного хозяйства и природопользования, г. Ростов-на-Дону

²Таганрогский институт имени А. П. Чехова (филиал), РГЭУ (РИНХ), г. Таганрог

³НИИ Многопроцессорных вычислительных систем им. акад. А. В. Каляева, г. Таганрог
cheese_05@mail.ru

РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДНЫЕ БИОРЕСУРСЫ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В БЕЛОМ МОРЕ

Целью работы является расчет воздействия на водные биоресурсы дноуглубительных работ в районе дельты р. Северная Двина и сброса грунта в Белом море. Фактическая оценка воздействия на кормовую базу рыб невозможна без применения наиболее современных и оптимизированных математических моделей, позволяющих спрогнозировать как распространение шлейфов взвеси в водной среде, так и изменение рельефа дна в связи с выпадением взвешенных частиц грунта в осадок. Выполнен расчет рыбопродуктивности района производства работ. Разработана и программно реализована модель транспорта взвешенных частиц. Разработанные численные алгоритмы и реализующий их комплекс программ были использованы для исследования гидробиологических процессов при ремонтных дноуглубительных работах. Рассчитано количество загрязненных вод при отвалах грунта и при работе дноуглубительной техники для расчета ущерба рыбным запасам, а также рассчитаны значения площадей областей, при которых наблюдается гибель донной растительности на отвалах и в районах дноуглубительных работ. На основе разработанного программного комплекса установлено, что уменьшение размеров областей отвалов грунта позволяет минимизировать ущерб, наносимый биотопам.

Ключевые слова: перемещение наносов; дискретная модель; сеточные уравнения; численный эксперимент; взвеси; дноуглубительные работы.

Kovtun I. I.¹, Protsenko E. A.², Sukhinov A. I.², Chistyakov A. E.³

¹The center of scientific and technical services in the field of fisheries and wildlife management. Rostov-on-Don, Russia

²Taganrogsky Institute of AP Chekhov (branch) RGEU (RINH). Taganrog, Russia

³Scientific-Research Institute of Multiprocessor Computing Systems of Southern Federal University. Taganrog, Russia

CALCULATING THE IMPACT ON AQUATIC RESOURCES DREDGING IN THE WHITE SEA

The aim of the study is to calculate the impact on aquatic resources dredging in the delta region of the Northern Dvina and the disposal site in the White Sea. The actual assessment of the impact on the food supply of fish is not possible without the use of the most modern and optimized mathematical models to predict the distribution of loops as a suspension in an aqueous medium, and the change of the bottom relief in connection with the loss of suspended soil particles in the sediment. The calculation of fish productivity area production work is done. The software model of transport of suspended particles is developed and implemented. The developed numerical algorithms and implementing their complex programs were used to investigate the hydro-biological processes in the maintenance dredging. The amount of polluted water with heaps of soil and dredging equipment operation is calculate to estimate the damage to fish stocks. The values of areas of the regions in which there is destruction of vegetation on the bottom dumps and in the areas of dredging are calculated as well. Based on the developed software package it is found that the decrease of spoil allows to minimize the damage to habitats.

Key words: sediment movement; discrete model, difference equations, numerical experiment, suspension, dredging.

Реки представляют собой динамичные экосистемы, которые обеспечивают биотопы для целого ряда сообществ живых организмов. Особую экономическую, экологическую и рыбохозяйственную ценность представляют дельтовые части рек. Дельты, как правило, представляют собой особую

Ковтун И. И., Проценко Е. А., Сухинов А. И., Чистяков А. Е. Расчет воздействия на водные биоресурсы дноуглубительных работ в Белом море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 27—38.

Kovtun I. I., Protsenko E. A., Sukhinov A. I., Chistyakov A. E. Calculating the impact on aquatic resources dredging in the White Sea. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 2, 27—38.

миниэкосистему в бассейне конкретной реки. Нарушение экологического баланса в сложившихся экосистемах дельты приводит к негативным изменениям в них и в регионе в целом. Одной из отрицательных сторон антропогенного воздействия на окружающую среду является проведение дноуглубительных работ в водных объектах. Водной экосистеме наносится значительный ущерб, заключающийся не только в нарушении биоценоза участков водоемов, вблизи которых ведутся работы, но и в загрязнении воды мелкодисперсными взвесями. Высокое содержание взвесей в воде вызывает гибель планктонных кормовых организмов рыб. При осаждении взвешенных частиц на дно наблюдается угнетение организмов зообентоса, являющихся неотъемлемым компонентом питания рыб, а также заиление мест нереста. Все это в конечном итоге приводит к снижению продукционных возможностей рассматриваемого района.

В соответствии с производственными условиями на подходном канале к причалам терминала, расположенного в протоке Кузнечиха — дельте р. Северная Двина, принят самоотвозный землесос типа ЗС-ТР1300/2*2162 (землесос самоотвозный, трюмный вместимостью 1000 м³ с двумя двигателями общей мощностью 2162 кВт). Ремонтные дноуглубительные работы на акватории и у причалов целесообразно выполнять одночерпаковым грейферным земснарядом с погрузкой и отвозкой грунта грунтоотвозными шаландами. Проектом предусмотрен плавучий кран грузоподъемностью 16 т с вместимостью грейфера 5.3 м³. Отвозить грунт предусмотрено на отвал № 146, расположенный в Белом море.

Согласно п. 39 «Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам» последствия негативного воздействия намечаемой деятельности на состояние водных биоресурсов определяются как от гибели или снижения продуктивности водных биоресурсов на всех стадиях их жизненного цикла, так и от гибели или снижения продуктивности их кормовых организмов [1]. При одновременных работах на одном и том же участке (или в одном и том же объеме воды) следует избегать повторного счета частичной или полной потери водных биоресурсов и их кормовых организмов в результате негативного воздействия намечаемой деятельности. Последствия определяются по наибольшему из компонентов. Состав ихтиофауны рыб, обитающих в дельте, эстуарной части и приустьевом взморье реки Северной Двины, включает 32 вида и состоит из обитателей как морских, так и пресных вод [2].

Протока Кузнечиха является: миграционным путем для семги, идущей на нерест; местом нагула корюшки до половозрелого возраста; местом ската миноги в море в июне-июле; местом нагула молоди карповых рыб (плотва, язь, лещ), которая держится в верхних слоях воды и у берегов на мелководьях в апреле-июне. Рыбопродуктивность водоемов Архангельской области низкая: в Белом море около 1 кг/га, в озерах от 1 до 4 кг/га. В реках она составляет 1—10 кг/га, в дельте Северной Двины достигает 11 кг/га (с учетом морских рыб, заходящих в дельту для нагула) [3]. Расчетная рыбопродуктивность района производства работ составила 11.4 кг/га. Расчеты приведены в табл. 1.

В связи с чем, при оценке воздействия за основу расчетов от производства работ был принят ущерб от гибели или снижения продуктивности кормовых организмов рыб. На основании многочисленных исследований [4—9], Россельхознадзором и ФГУ «ЦУРЭН» рекомендовано для расчета ущерба рыбным запасам принимать пороговые величины воздействия взвеси на планктон — 50 % потерь при концентрациях в пределах 20—100 мг/л, и 100 % — при концентрациях выше 100 мг/л. При концентрациях от 0.25 до 20 мг/л принята величина 20 % потерь. Крупные животные рыхлых грунтов, попавшие в зону выпадения взвешенных частиц грунта, в большинстве случаев остаются жизнеспособными. При толщине осадка более 10 мм отмечается 100 %-ная гибель бентоса, 50 %-ная гибель — по площадям дна, покрытым слоем осадков 5—10 мм [10—12].

Постановка начально-краевой задачи. Для описания динамики донных материалов в работе применяются уравнения, которые описывают переформирование прибрежной зоны водоемов, где вода и твердые частицы перемещаются в одном направлении. Исходные уравнения процесса перемещения наносов [13—17] с учетом ограничений на касательные напряжения на дне расчетной области могут быть записаны в следующем виде [15—17]:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial h}{\partial t} + \operatorname{div}(k \bar{\tau}_b) = \operatorname{div}\left(k \left(\tau_{bc} / \sin \varphi_0\right) \operatorname{grad} h\right), \quad (1)$$

$$k = \frac{A \nu d}{((\rho_1 - \rho_0) g d)^\beta} \left| \bar{\tau}_b - \frac{\tau_{bc}}{\sin \varphi_0} \operatorname{grad} h \right|^{\beta-1} \theta \left(\left| \bar{\tau}_b - \frac{\tau_{bc}}{\sin \varphi_0} \operatorname{grad} h \right| - \tau_{bc} \right), \quad (2)$$

Таблица 1

Расчет рыбопродуктивности района производства работ

Показатель	Вид рыбы											
	Речная камбала	Сиг	Корюшка	Минога	Стерлядь	Лещ	Налим	Семга	Плотва	Язь	Окунь	Прочие
Численность производителей, шт./га	2	0.1	0.7	0.8	0.7	4	0.1	0.05	2	2	3	18
Процент самок, %	55	50	60	50	60	60	50	84	55	60	50	60
Численность самок, шт.	1.1	0.1	0.4	0.4	0.4	2.4	0.1	0.04	1.1	1.2	1.5	10.8
Индивидуальная плодовитость, тыс.шт.	45	10	36	90	20	100	300	16	30	65	50	30
Количество выметанной икры, тыс.шт.	180	1	15	36	8	240	15	1	33	45	75	324
Коэффициент промвозврата от икры, %	0.0002	0.002	0.04	0.003	0.02	0.005	0.001	0.048	0.01	0.005	0.01	0.01
Численность рыб в промвозврате, шт.	0.4	0.1	6.0	1.1	1.7	12.0	0.2	0.3	3.3	2.3	7.5	32.4
Средняя масса одной рыбы, кг	0.15	0.16	0.08	0.15	0.3	0.45	1	2.75	0.1	0.25	0.15	0.05
Рыбопродуктивность нерестилищ, кг/га	0.1	0.1	0.5	0.2	0.5	5.4	0.2	0.9	0.3	0.6	1.1	1.6

где $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ — функция Хэвисайда, где h — глубина дна, отсчитываемая от невозмущенной

поверхности водоема (м); ε — пористость грунта; τ_b — касательное напряжение на дне (Н/м^2); τ_{bc} — критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов (Н/м^2); A и β — безразмерные постоянные ($A = 19.5$, $\beta = 3$); $\bar{\omega}$ — частота волны (с^{-1}); d — характеристика осадков (мм).

Уравнение (1) дополняется начальным условием:

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y)$$

На границе расчетной области отсутствует поток, вызванный влиянием гравитационных сил:

$$H'_0(x, y) = 0$$

В модели транспорта взвешенных частиц использована декартова система координат в горизонтальной плоскости и σ -координатная система в вертикальном направлении [18—20]: $\sigma = \frac{z - \eta}{h + \eta}$, $x_\sigma = x$, $y_\sigma = y$, $t_\sigma = t$, здесь $\sigma = a = 0$ на свободной поверхности; $\sigma = b = -1$ на дне; $H = h + \eta$ — общая глубина до свободной поверхности, $h = h(x, y)$ — глубина водного объекта, $\eta = \eta(t, x, y)$ — возвышение свободной поверхности относительно геоида (уровня моря). Для описания транспорта взвешенных частиц использовано уравнение диффузии-конвекции, которое может быть записано в следующем виде [21—23]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{a-b}{H} (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial \sigma} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \left(\frac{a-b}{H} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + F, \end{aligned} \quad (3)$$

где C — концентрация примеси (мг/л); $V = \{u, v, w\}$ — составляющие поля вектора скорости (м/с); w_s — гидравлическая крупность или скорость осаждения взвеси в вертикальном направлении (м/с); H — глубина (м); D_h , D_v — горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$);

x, y — координаты в горизонтальном направлении; σ — координата в вертикальном направлении; t — временная переменная (с); F — функция, описывающая интенсивность распределения источников загрязняющих веществ (мг/л·с).

На свободной поверхности Γ_s поток в вертикальном направлении равен нулю, таким образом:

$$\left(\frac{a-b}{H}\right) D_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} + w_s C_k = 0.$$

$$\text{Вблизи поверхности дна } \Gamma_b: \left(\frac{a-b}{H}\right) D_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} = E - D + w_s C_k,$$

где E — поток эрозии (кг/м²·с); D — интенсивность осаждения осадка (кг/м²·с); C_k — массовая концентрация взвеси (кг/м³); n — единичный вектор нормали к открытой границе Γ_{open} .

Дискретная модель транспорта взвешенных частиц. Расчетная область вписана в параллелепипед. Для численной реализации дискретной математической модели поставленной задачи гидродинамики вводится равномерная сетка:

$$\bar{w}_h = \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y, \sigma_k = kh_\sigma; n = 0 \dots N_t, i = 0 \dots N_x, j = 0 \dots N_y, k = 0 \dots N_\sigma; \\ N_t \tau = T, N_x h_x = l_x, N_y h_y = l_y, N_\sigma h_\sigma = 1\},$$

где τ — шаг по времени; N_σ, h_y, h_σ — шаги по пространству; N_t — количество временных слоев; T — верхняя граница по времени; N_x, N_y, N_σ — количество узлов по пространству; l_x, l_y — границы по пространству.

Через $o_{i,j,k}$ обозначена «заполненность» ячейки (i, j, k) . Вводятся коэффициенты $q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$, описывающие заполненность областей, находящихся в окрестности ячейки [23].

На основе метода баланса с учетом коэффициентов заполненности контрольных областей q_m , $m = 0 \dots 6$ можно аппроксимировать систему уравнений (3), при этом дискретный аналог уравнения для расчета транспорта взвеси примет вид:

$$(q_0)_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\tau} + (q_1)_{i,j,k} u_{i+1/2,j,k} \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{2h_x} + (q_2)_{i,j,k} u_{i-1/2,j,k} \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{2h_x} + \\ + (q_3)_{i,j,k} v_{i,j+1/2,k} \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{2h_y} + (q_4)_{i,j,k} v_{i,j-1/2,k} \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{2h_y} + \\ + (q_5)_{i,j,k} \frac{a-b}{H} (w_{i,j,k+1/2} - w_s) \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{2h_\sigma} + (q_6)_{i,j,k} \frac{a-b}{H} (w_{i,j,k-1/2} - w_s) \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k-1}^n}{2h_\sigma} = \\ = (q_1)_{i,j,k} D_{i+1/2,j,k} \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{h_x^2} - (q_2)_{i,j,k} D_{i-1/2,j,k} \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{h_x^2} + \\ + (q_3)_{i,j,k} D_{i,j+1/2,k} \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{h_y^2} - (q_4)_{i,j,k} D_{i,j-1/2,k} \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{h_y^2} + \\ + (q_5)_{i,j,k} \left(\frac{a-b}{H}\right)^2 D_{i,j,k+1/2} \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{h_\sigma^2} - (q_6)_{i,j,k} \left(\frac{a-b}{H}\right)^2 D_{i,j,k-1/2} \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k-1}^n}{h_\sigma^2} + F_{i,j,k}^n.$$

Для расчета компонент вектора скорости движения водной среды использована трехмерная модель гидродинамического обтекания рельефа дна с учетом донного трения и подъема уровня [24—27]. Отметим, что ведутся работы по увеличению быстродействия работы программного комплекса за счет увеличения шага по временной переменной. Используются регуляризированные схемы по Б. Н. Четверушкину [28] и разностные схемы с оптимальными весами [29]. Сеточные уравнения, полученные в результате неявных конечно-разностных аппроксимаций, решаются с помощью алгоритма адаптивного модифицированного попеременно-треугольного метода [30—35].

Программная реализация математической модели. Разработанное экспериментальное программное обеспечение на базе ЭВМ предназначено для численной реализации прогностических

моделей экосистем водоемов. Программа «Sediments» предназначена для построения турбулентных потоков несжимаемого поля скоростей водной среды на сетках с высокой разрешающей способностью и расчета изменения рельефа дна. Данная программа используется для расчета процессов транспорта твердого вещества, как находящихся в придонном слое, так и во взвешенном состоянии и учитывает изменения рельефа дна и поля скоростей водной среды. Программа учитывает следующие физические параметры: динамически изменяемую геометрию дна и функцию возвышения уровня; турбулентный обмен; поток вектора скорости на боковой границе; ветровые течения и трение о дно; транспорт наносов, находящихся в придонном слое; переход донного материала во взвешенное состояние и осаждение; транспорт взвешенных частиц; пористость грунта; критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: переход от z -координатной системы к σ -координатной системе; расчет поля скорости без учета давления; расчет гидростатического давления, которое используется в качестве начального приближения для гидродинамического давления; расчет гидродинамического давления; расчет трехмерного поля скорости с учетом давления; расчет транспорта взвеси; расчет геометрии дна водоема. Схема алгоритма программы «Sediments» представлена на рис. 1.

Объемы работ и технические характеристики оборудования. Дноуглубительные работы на подходном канале будут выполняться самоотвозным землесосом типа ЗС-ТР 1300/2-2162, на акватории причалов терминала — грейферным земснарядом (плавкран). Производительность оборудования по грунту составляет: грейферный земснаряд — 122.4 м³/ч, самоотвозный землесос — 778 м³/ч.

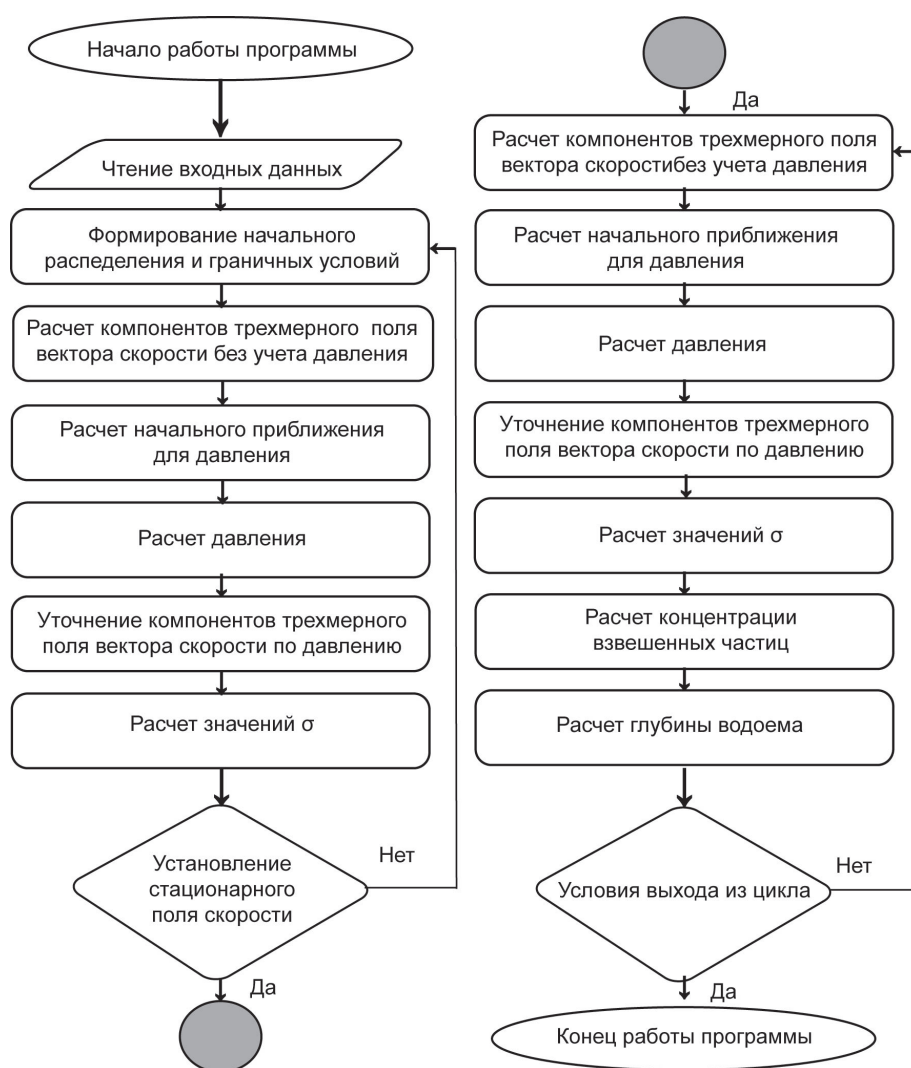


Рис. 1. Схема алгоритма программы «Sediments».

Самоотвозный землесос типа ЗС-ТР1300/2-2162: объем трюма при разработке песков — 1000 м³; норма загрузки грунтового трюма — 741 м³; продолжительность сброса грунта на подводном отвале — 0.1 ч; периодичность сброса грунта в зависимости от расположения участков дноуглубительных работ приведена в табл. 2.

Грейферный земснаряд: отвозка грунта на подводный отвал осуществляется 2 грунтоотвозными шаландами типа ШС-ТР500/2-442 с емкостью грунтового трюма 500 м³, норма загрузки грунтового трюма разработанным грунтом составляет 455 м³.

Расчетные показатели работы самоотвозного землесоса приведены в табл. 2. Расчетные показатели работы грейферного земснаряда (плавкрана) приведены в табл. 3.

Численные эксперименты по моделированию транспорта взвеси. При оценке скорости течений в протоке Кузнечиха учитывалось, что при приливной скорости течений 0.5 м/с, продолжительности прилива (отлива) 6 ч и скорости отлива 0.25 м/с, средняя скорость фактического переноса взвешенных частиц диаметром 0.05 мм составит 0.12 м/с. Средняя скорость фактического переноса взвешенных частиц диаметром 0.05 мм, которые наносят наибольший вред водным биоресурсам, на отвалах составит 0.2 м/с. На рис. 2 приведен результат расчета вертикального профиля горизонтальной компоненты вектора скорости течения.

Моделирование распространения взвешенных частиц при выгрузке трюма самоотвозного землесоса в отвал № 146. Исходными данными являются: глубина водоема 10 м; объем загрузки 741 м³;

Таблица 2

**Результаты расчета производственных показателей работы
самоотвозного землесоса типа ЗС-ТР1300/2-2162**

№ уч-ка	Объем дноработ, м ³	Расстояние отвозки грунта на подводный отвал № 146, S, км	Затрата времени на операции, t ₁ , маш.-ч	Периодичность сброса грунта, ч	Производительность землесоса в цикле, м ³ /ч	Суточная выработка землесоса, м ³	Затрата времени на работу, сут
1	31511.0	42.9	1.52	8.64	115.7	2360	13.4
2	6032.0	44.2	1.52	8.86	112.9	2303	2.6
3	11331.6	44.9	1.52	8.98	111.4	2273	5
4	5969.6	45.4	1.52	9.07	110.3	2250	2.7
5	3903.9	46.1	1.52	9.19	108.8	2220	1.8
6	21649.8	47.1	1.52	9.36	106.8	2179	9.9
7	23122.8	47.8	1.52	9.48	105.5	2152	10.7
8	1947.5	49.9	1.52	9.83	101.7	2075	0.9
9	1710.3	51.7	1.52	10.14	98.6	2011	0.9
10	6498.8	52.4	1.52	10.26	97.5	1989	3.3
11	4655.5	52.7	1.52	10.31	97	1979	2.4
	118332.8						53.6

Таблица 3

Расчетные показатели работы грейферного земснаряда (плавкрана)

№ уч-ка	Объем дноработ, м ³	Место подводного отвала грунта	Дальность отвозки, км	Часовая производительность земснаряда, м ³ /ч	Коэффициент использования рабочего периода (КИРП)	Суточная выработка земснаряда, м ³	Затрата времени на работу, сут
1А	20263.3	№ 150	23.0	122.4	0.78	2291	8.9
2А	8230.6	№ 146	52.15	122.4	0.49	1439	5.7
3А	14696.8	№ 146	52.15	122.4	0.49	1439	10.2
	43190.7						24.8

скорость течения 0.2 м/с; скорость осаждения 2.042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0.05$ мм) в песчаных грунтах — 26.83 %. Параметры расчетной области: длина 3 км; ширина 1.4 км; шаг по горизонтальной пространственной координате 20 м; шаг по вертикальной пространственной координате 1 м; расчетный интервал 2 ч.

На рис. 3 приведены зависимости от времени (ч) объема воды (млн м³) с содержанием взвешенных частиц. На рис. 4 приведена функция рельефа дна (м) после осаждения взвешенных частиц, образованных при выгрузке трюма самоотвозного землесоса (размеры участка: длина 2 км; ширина 1 км). Палитрой показана глубина участка. На рис. 5 приведена динамика изменения концентрации взвешенных частиц (мг/л) с течением времени. Приведены значения поля концентрации взвеси в сечении расчетной области плоскостью, проходящей через точку выгрузки и образованную векторами, направленными вертикально и вдоль течения. Расчетный интервал составлял: 15, 30 мин, 1, 2 ч соответственно. Течения направлены слева направо.

Моделирование распространения взвешенных частиц при работе самоотвозного землесоса. Исходными данными являются: глубина водоема 10 м; объем грунта, ушедшего в перелив 216 м³; время работы 83 мин; средняя скорость течения 0.12 м/с; ширина 0.4 км; скорость осаждения 2.042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0.05$ мм) в песчаных грунтах — 26.83 %. Параметры расчетной области: длина 1.5 км; шаг по горизонтальной пространственной координате 10 м; шаг по вертикальной пространственной координате 1 м; расчетный интервал 4 ч.

На рис. 6 приведены зависимости от времени (ч) объема воды (млн м³) с содержанием взвешенных частиц. На рис. 7 приведена функция изменения рельефа (мм) дна после осаждения взвешенных частиц, образованных при одном цикле работы самоотвозного землесоса (размеры участка: длина 1 км; ширина 200 м). Палитрой показана глубина участка.

На рис. 8 приведена динамика изменения концентрации взвешенных частиц (мг/л) с течением времени. Приведены значения поля концентрации взвеси в сечении расчетной областью плоскостью, проходящей через точку выгрузки и образованную векторами направленными: вертикально и вдоль течения. Палитрой показано значение концентрации взвешенных частиц. Расчетный интервал составлял: 30 мин, 1, 1.5, 2, 3, 4 ч соответственно. Направление течения слева направо.

Моделирование распространения взвешенных частиц при работе грейферного земснаряда. Исходными данными являются: глубина водоема 10 м; объем грунта перешедшего во взвесь 15 м³/ч; средняя скорость течения 0.12 м/с; скорость осаждения 2.042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0.05$ мм) в песчаных грунтах — 26.83 %. Параметры расчетной области: длина 1.5 км; шаг по горизонтальной пространственной координате 10 м; шаг по вертикальной пространственной координате 1 м; расчетный интервал 4 ч.

На рис. 9 приведены зависимости от времени (ч) объема воды, в которых за час (млн. м³) работы земснаряда возникают концентрации взвешенных частиц более 0.25 и более 20 мг/л.

Верификация модели. В инженерных расчетах площадь заиления вычисляется по эмпирической формуле [36]:

$$F = \frac{B_1 + B_2}{2L}, \quad B_2 = B_1 + 2 \operatorname{tg} 13^\circ L. \quad (4)$$

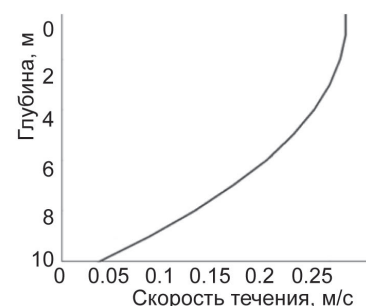


Рис. 2. Вертикальный профиль горизонтальной компоненты вектора скорости течения.

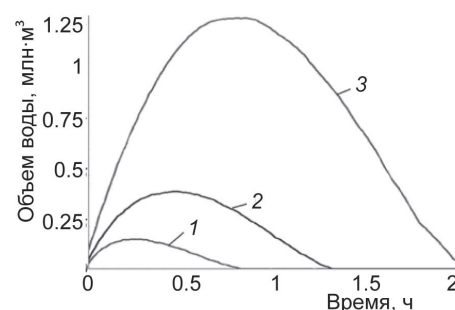


Рис. 3. Зависимости от времени объема воды с содержанием взвешенных частиц.
1 — более 100 мг/л; 2 — более 20 мг/л; 3 — более 0.25 мг/л.

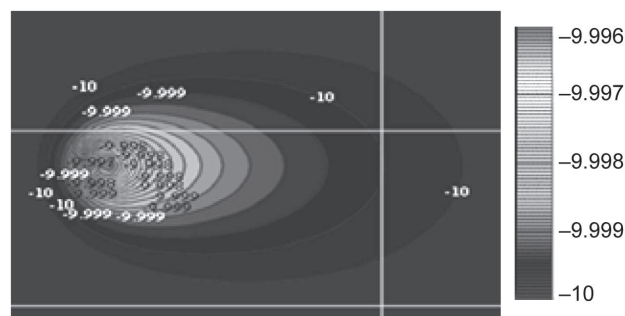


Рис. 4. Функция рельефа дна после осаждения взвешенных частиц, образованных при выгрузке трюма самоотвозного землесоса.

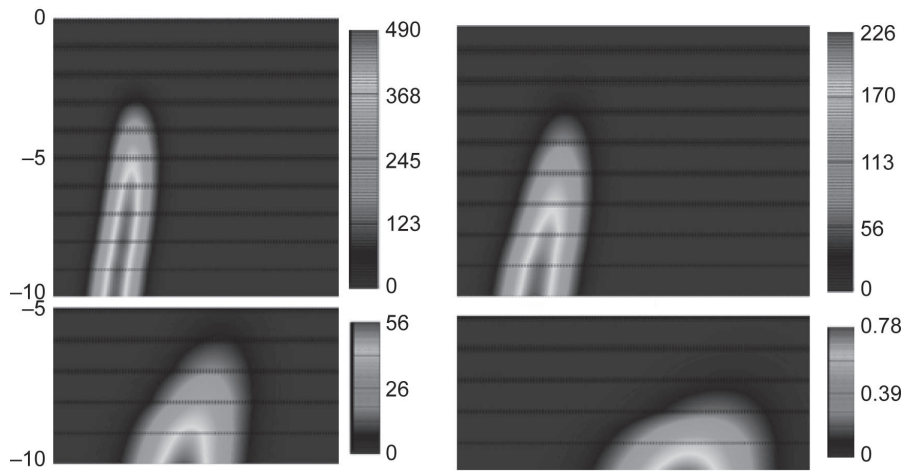


Рис. 5. Значения поля концентрации взвешенных частиц через 15, 30 мин, 1, 2 ч после момента выгрузки трюма землесоса.

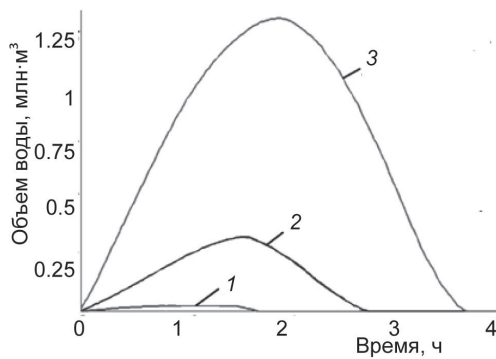


Рис. 6. Зависимости от времени объема воды с содержанием взвешенных частиц.
1 — более 100 мг/л; 2 — более 20 мг/л;
3 — более 0.25 мг/л.

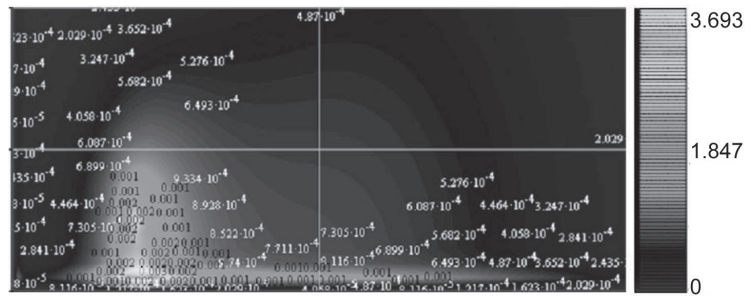


Рис. 7. Функция изменения рельефа дна после осаждения взвешенных частиц, образованных при одном цикле работы самоотвозного землесоса.

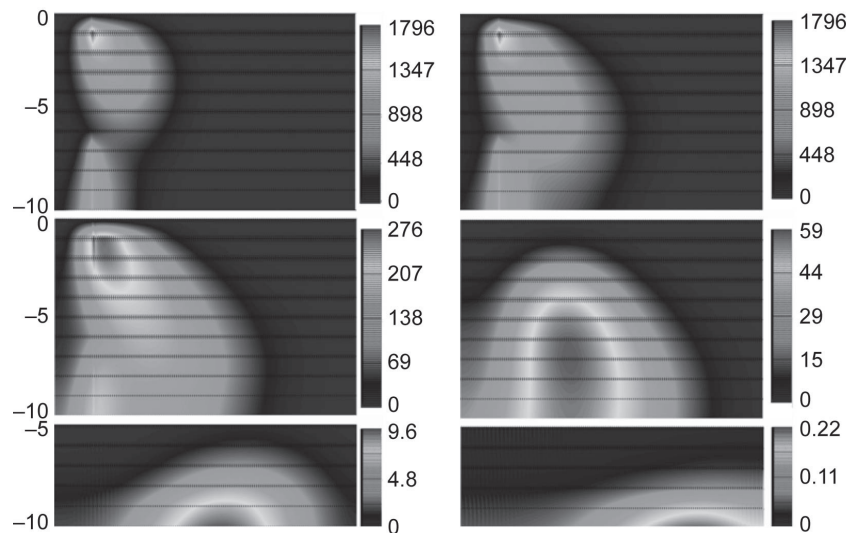


Рис. 8. Значения поля концентрации взвешенных частиц через: 30 мин, 1, 1.5, 2, 3, 4 ч после начала работы землесоса.

На рис. 10 приведены зависимости ширины зоны смешения, м (влияние диффузионного перемешивания на картины распределения взвешенных частиц) от расстояния до створа, м (влияние конвективного переноса), рассчитанные на основе разработанного программного комплекса (на рисунке показаны кружками) и на основе формулы (4) (показаны сплошной линией).

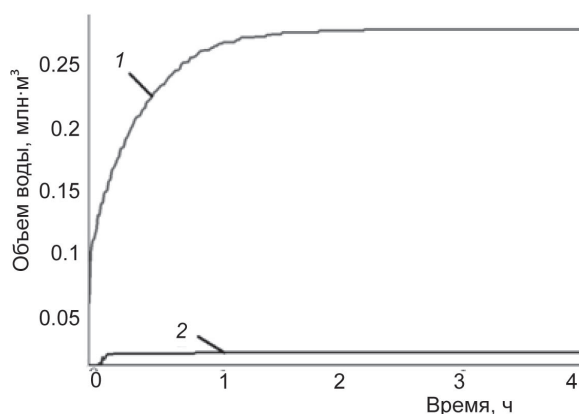


Рис. 9. Зависимости от времени объемов воды, в которых за час работы земснаряда возникают концентрации взвешенных частиц.
1 — более 0.25 мг/л, 2 — более 20 мг/л.

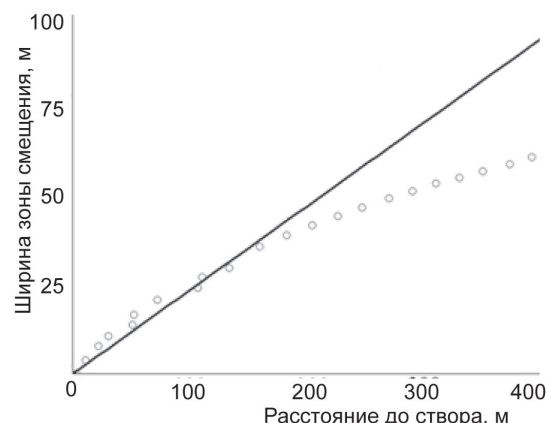


Рис. 10. Зависимости ширины зоны смешения от расстояния до створа.

Из результатов численных экспериментов видно, что в случае расстояния до створа 150 м и менее можно принять гипотезу о том, что интенсивность диффузионного перемешивания зависит линейно от интенсивности конвективного переноса и составляет $\sim 23.1\%$ ($\text{tg} 13^\circ$). При больших расстояниях преобладание конвективного переноса над диффузионными процессами усиливается.

Результаты расчетов объема загрязненной воды. Исходя из полученных материалов, рассчитываем общее количество загрязненной воды при отвалах грунта (табл. 4) и при работе дноуглубительной техники (табл. 5).

Моделирование изменения рельефа дна при осаждении взвешенных частиц в отвале № 146. Исходными данными являются: глубина водоема 10 м; объем загрузки шаланды 455 м³; количество рейсов, которые делает шаланда — 50; общий объем выгрузки шаландами — 22 927 м³; объем загрузки землесоса 741 м³; количество рейсов, которые делает землесос — 124; общий объем выгрузки землесосом — 91 599.8 м³; скорость течения 0.2 м/с; скорость осаждения 2.042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0.05$ мм) в песчаных грунтах — 26.83 %. Параметры расчетной области: длина 5 км; ширина 3.5 км; шаг по горизонтальной

Таблица 4

Объемы загрязненной воды при сбросе грунта самоотвозным землесосом на отвал № 146, шаландой на отвал № 146 и шаландой на отвал № 150

Общий объем загрязненной воды при разовом сбросе, млн м ³	В том числе воды с концентрациями загрязняющих веществ, млн м ³			Количество сбросов	Общий объем воды с концентрациями загрязняющих веществ, млн м ³		
	Более 0.25 мг/л	Более 20 мг/л	Более 100 мг/л		Более 0.25 мг/л	Более 20 мг/л	Более 100 мг/л
1.285	0.890	0.245	0.150	124	110.360	30.380	18.600
1.120	0.813	0.202	0.105	50	40.650	10.100	5.250
1.279	0.889	0.240	0.150	45	40.005	10.800	6.750

Таблица 5

Объемы загрязненной воды при работе самоотвозного землесоса и грейферного земснаряда

Общий объем загрязненной воды при одном цикле, млн м ³	В том числе воды с концентрациями загрязняющих веществ, млн м ³			Количество циклов	Общий объем воды с концентрациями загрязняющих веществ, млн м ³		
	Более 0.25 мг/л	Более 20 мг/л	Более 100 мг/л		Более 0.25 мг/л	Более 20 мг/л	Более 100 мг/л
1.305	0.975	0.290	0.040	124	120.900	35.960	4.960
0.264	0.255	0.009	—	352.87	89.981	3.176	-

пространственной координате 20 м; шаг по вертикальной пространственной координате 1 м; расчетный интервал 4 ч.

На рис. 11 приведены результаты моделирования изменения рельефа дна в случае размеров области выгрузки на отвал диаметром 1852 м соответственно и показаны области со слоем осадка более 5 и 10 мм. Палитрой показаны значения функции рельефа дна.

Моделирование изменения рельефа дна при осаждении взвешенных частиц в отвале № 150.

Исходными данными являются: глубина водоема 10 м; объем загрузки шаланды 455 м³; количество рейсов, которые делает шаланда — 45; общий объем выгрузки шаландами — 20263.3 м³; ширина отвала — 105 м; скорость течения 0.2 м/с; скорость осаждения 2.042 мм/с (по Стоксу); плотность грунта 1600 кг/м³; процентное содержание пылеватых частиц ($d < 0,05$ мм) в песчаных грунтах — 26.83 %, ширина протоки 0.7 км. Параметры расчетной области: длина 3 км; шаг по горизонтальной пространственной координате 10 м; шаг по вертикальной пространственной координате 1 м; расчетный интервал 4 ч.

На рис. 12 приведены результаты моделирования изменения рельефа дна в случае выгрузки на отвал № 150 (1440 × 105 м). Палитрой показаны значения функции рельефа дна. В табл. 6 приведены значения площадей областей со слоем осадка более 5 и 10 мм на подводных отвалах.

Необходимо отметить, что проведенное моделирование показало, что в случае сокращения использования площади отвала при сбросе грунта, площади заиления также будет значительно сокращены, а рельеф дна не претерпит сильных изменений. Выполнено моделирование изменения рельефа дна в случае сокращения размеров области выгрузки на отвал № 146 до размеров 500 × 500 м, и на отвал № 150 до размеров 80 × 800 м. В табл. 7 приведены значения площадей областей со слоем осадка более 5 и 10 мм в случае сокращения использования площадей отвалов.

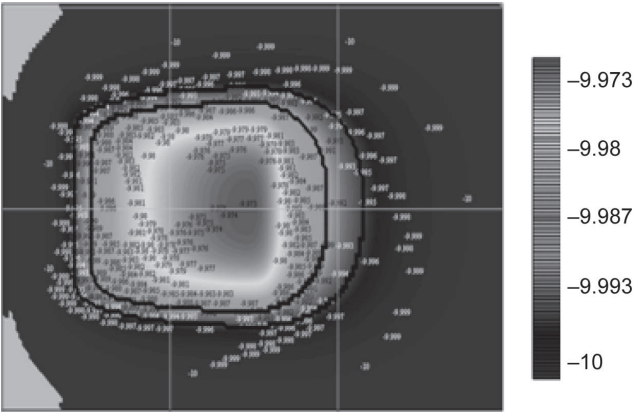


Рис. 11. Функция рельефа дна на отвале № 146.

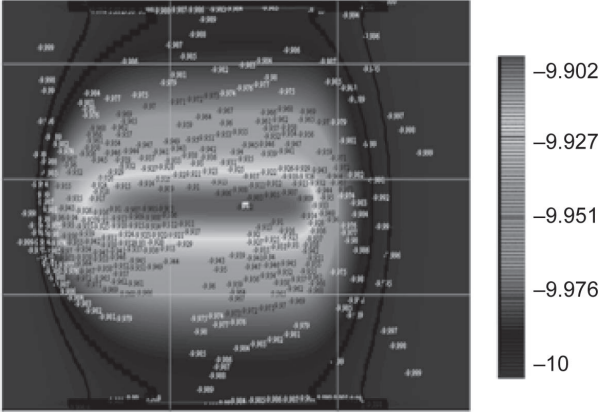


Рис. 12. Функция рельефа дна на отвале № 150.

Таблица 6

Значения площадей областей со слоем осадка более 5 и 10 мм на отвалах

Наименование отвала	Площадь областей со слоем осадка более 5 мм, км ²	Площадь областей со слоем осадка более 10 мм, км ²
Отвал № 146	1.828	1.314
Отвал № 150	1.347	1.151

Таблица 7

Значения площадей областей со слоем осадка более 5 и 10 мм в случае сокращения использования площадей отвалов

Наименование отвала	Площадь областей со слоем осадка более 5 мм, км ²	Площадь областей со слоем осадка более 10 мм, км ²
Отвал № 146 (500 × 500 м)	1.189	0.900
Отвал № 150 (80 × 800 м)	0.999	0.858

Таким образом, при производстве работ следует предусмотреть возможность минимизации использования площади отвалов, с целью снижения ущербов, наносимых водным биоресурсам.

Результаты эксперимента позволяют проанализировать динамику изменения геометрии дна, образования структур и наносов, переноса взвесей в акватории, а также уровень загрязнения вод. Данная математическая модель и разработанный проблемно-ориентированный комплекс программ позволяют предсказать появление морских гряд и кос, их рост и трансформацию, прогнозировать изменение поля концентрации в случае выброса от источника, прогнозировать заиливание подходов судоходных каналов, заносимость гидротехнических конструкций и сооружений.

Рыбохозяйственное значение дельты р. Северная Двина определяется не только наличием в ней условий для воспроизводства ценных видов рыб, относящихся к семействам лососевые, осетровые, сиговые, но и в значительной мере наличием мест нагула рассматриваемых видов рыб. Фактическая оценка воздействия на кормовую базу рыб невозможна без применения наиболее современных и оптимизированных математических моделей, позволяющих спрогнозировать как распространение шлейфов взвеси в водной среде, так и изменение рельефа дна в связи с выпадением взвешенных частиц грунта в осадок. Произведенные расчеты позволили рассмотреть возможность минимизации площадей существующих отвалов грунта до размеров 500×500 м по отвалу № 146, и 80×800 м по отвалу № 150. Уменьшение размеров областей отвалов грунта позволяет минимизировать ущерб, наносимый биотопам.

Работа выполнена при частичной поддержке Задания №2014/174 в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ по проектам № 15-01-08619, № 15-07-08626.

Литература

1. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 25 ноября 2011 г. № 1166 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам».
2. Новоселов А. П. Ихтиофауна малых рек, впадающих в Двинской залив Белого моря // Экологические проблемы Европейского Севера. Архангельск, 1992.
3. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации <http://www.mnr.gov.ru>.
4. Научно-методические подходы к оценке воздействия газонефтедобычи на экосистемы морей Арктики (на примере Штокманского проекта). Апатиты, 1997. 393 с.
5. Чернявский А. В. Трансформация донных зооценозов в районе Григоровской свалки грунта // Дноуглубительные работы и проблемы охраны рыбных запасов и окружающей среды рыбохозяйственных водоемов. Астрахань, 1984. С. 208—210.
6. Пирогов В. В., Андриянов В. А., Андреев В. Ю. Влияние дноуглубительных работ на состояние фауны моллюсков Волго-Каспийского канала // Дноуглубительные работы и проблема охраны рыбных запасов и окружающей среды рыбохозяйственных водоемов. Астрахань, 1984.
7. Аршианица Н. М. Отчет: Рыбохозяйственная оценка дноуглубительных работ в системе водоемов Новгородского водно-транспортного узла, 1991. Фонды ГосНИОРХ.
8. Суслопарова О. Н. Отчет: Рыбохозяйственный мониторинг при производстве дноуглубительных работ на акватории Нефтяной гавани, 2003. Фонды ГосНИОРХ.
9. Суслопарова О. Н. Отчет: Локальный мониторинг окружающей среды при производстве дноуглубительных работ в Сайменском канале. Раздел «Рыбохозяйственный мониторинг», 2001. Фонды ГосНИОРХ.
10. Корректировка «Проекта на разработку месторождения песков «Сестрорецкое», расположенного в Финском заливе Балтийского моря» в связи с реконструкцией карьера. ООО «Эко-Экспресс-Сервис», 2012.
11. Иванова В. В. Экспериментальное моделирование заваливания зообентоса при дампинге грунтов // ГосНИОРХ. 1988. Вып. 85. С. 107—113.
12. Морозов А. Е. Донная фауна малых рек и влияние на нее взвешенных веществ дренажных вод // Рыбохозяйственные исследования водоемов Урала. Л., 1979.
13. Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: Геос., 2001. 272 с.
14. Проценко Е. А. Модель и алгоритмы решения задачи о транспорте наносов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. Т. 97, № 8. С. 71—75.
15. Проценко Е. А. Двумерная конечно-разностная модель формирования наносов в прибрежной зоне водоема и ее программная реализация // Инженерный вестник Дона. 2010. Т. 13, № 3. С. 23—31.
16. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Проценко Е. А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 12. С. 65—82.
17. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Проценко Е. А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежных водных системах на многопроцессорной вычислительной системе // Вычислительные методы и программирование. 2014. Т. 15. С. 610—620.
18. Ezer T., Mellor G. L. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2000. V. 32. P. 155—208.

19. Дегтярева Е. Е., Проценко Е. А., Чистяков А. Е. Программная реализация трехмерной математической модели транспорта взвеси в мелководных акваториях // Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 23, № 4—2. С. 30.
20. Дегтярева Е. Е., Чистяков А. Е. Моделирование транспорта наносов по данным экспериментальных исследований в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 2 (127). С. 112—118.
21. Сухинов А. И., Никитина А. В., Чистяков А. Е., Семенов И. С. Математическое моделирование условий формирования заморов в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 103—112.
22. Сухинов А. И., Никитина А. В. Математическое моделирование и экспедиционные исследования качества вод в Азовском море // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 62—73.
23. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Фоменко Н. А. Методика построения разностных схем для задачи диффузии-конвекции-реакции, учитывающих степень заполненности контрольных ячеек // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 4. С. 87—98.
24. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Алексеенко Е. В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 3. С. 3—21.
25. Васильев В. С., Сухинов А. И. Прецизионные двумерные модели мелких водоемов // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 10. С. 17—34.
26. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Тимофеева Е. Ф., Шишени А. В. Математическая модель расчета прибрежных волновых процессов // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 8. С. 32—44.
27. Чистяков А. Е. Об аппроксимации граничных условий трехмерной модели движения водной среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 6(107). С. 66—77.
28. Четверушкин Б. Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнений сплошных сред // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 11. С. 33—52.
29. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Шишени А. В. Оценка погрешности решения уравнения диффузии на основе схем с весами // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 11. С. 53—64.
30. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
31. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978.
32. Коновалов А. Н. Метод скорейшего спуска с адаптивным попеременно-треугольным переобусловливателем // Дифференциальные уравнения. 2004. Т. 40, № 7. С. 953.
33. Коновалов А. Н. К теории попеременно-треугольного итерационного метода // Сибирский математический журнал. 2002. Т. 43, № 3. С. 552.
34. Сухинов А. И., Чистяков А. Е. Адаптивный модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 1. С. 3—20.
35. Чистяков А. Е. Теоретические оценки ускорения и эффективности параллельной реализации ПТМ скорейшего спуска // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. №6(107). С. 237—249.
36. Типовая технологическая схема добычи песка, гравия и песчано-гравийной смеси судоходных рек и других водоемов. М.: Транспорт, 1980.

Статья поступила в редакцию 24.03.2015 г.