

С.Д. Мартьянов, В.А. Рябченко, А.Е. Рыбалко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗМУЧИВАНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ В НЕВСКОЙ ГУБЕ

S.D. Martyanov, V.A. Ryabchenko, A.E. Rybalko

MODELLING OF SEDIMENT RESUSPENSION IN THE NEVA BAY

Трехмерная гидродинамическая модель Невской губы расширяется включением в нее блоков для расчета характеристик волнения и концентрации взвешенного осадочного вещества. Дно Невской губы делится на районы с преобладанием одной из двух фракций осадков — песков или илов, с различными параметрами частиц. Проводится оценка чувствительности модели к выбору критического значения придонного напряжения, при котором начинается взмучивание. Полученные результаты сравниваются с измерениями мутности воды в Невской губе.

Ключевые слова: взмучивание, донные осадки, модели, Невская губа.

A three-dimensional numerical model of the Neva Bay was extended by adding new modules for computation of wave parameters and suspended sediment concentration. The bottom of the Neva Bay was divided into areas with predominance of either sand or silt sediments with different particles' characteristics. Sensitivity analysis of the choice of the critical bottom shear stress is carried out. The results obtained are compared with turbidity measurements in the Neva Bay.

Key words: resuspension, bottom sediments, models, Neva Bay.

1. Введение

На границе раздела вода-дно происходят процессы седиментации и взмучивания осадочного вещества. В спокойную погоду взвесь опускается и оседает на дно, формируя при этом слой осадочных отложений. При высоких значениях динамической скорости у дна это вещество взмучивается и вновь поступает в воду. В штормовых условиях кинетическая энергия волн играет основную роль в увеличении поступления взвеси к поверхности моря [13, 7, 3]. Ее дальнейший перенос определяется преимущественно течениями.

В выполненных до сих пор работах по моделированию переноса примеси в Невской губе [5, 9] рассматривался перенос примеси от точечных источников. Процесс взмучивания частиц со дна и их последующего осаждения и переноса никак не учитывался.

Цель настоящей работы – моделирование процесса взмучивания донных осадков в мелководном водоеме на примере Невской губы. Для этого имеющаяся трехмерная гидродинамическая модель Невской губы [2] была дополнена блоком для расчета концентрации и переноса поступающего в воду со дна осадочного материала (раздел 2.1), а также расчетным блоком для определения характеристик волнения (раздел 2.2). Рассматривались два типа осадочных отложений, иловые и песчаные, характеризующиеся различной плотностью и размером частиц. Скорость гравитационного оседания и значение критического придон-

ного сдвигового напряжения для каждой фракции частиц рассчитывались как аналитически, так и с использованием опубликованных результатов лабораторных и натурных измерений (раздел 2.3). Модифицированная модель использовалась для расчета концентрации взвешенных частиц в Невской губе (раздел 3).

2. Методы

2.1. Параметризация процесса взмучивания и переноса донных осадков

В настоящей работе использовалась трехмерная гидродинамическая модель Невской губы, основанная на океанической модели Принстонского университета [4]. Модель имеет в вертикальном направлении σ -координату (7 равномерно расположенных уровней), зависящую от глубины. Это позволяет исследовать процесс взмучивания даже в мелководной прибрежной зоне. Горизонтальная сетка – неравномерная, квазиортогональная, имеющая в направлении с запада на восток 350 узлов, в направлении с юга на север – 182 узла. Минимальное разрешение модели по горизонтали составляет 60–70 м, минимальная глубина – 0,2 м.

С целью учета взмучивания, оседания и транспорта минеральных донных частиц модель Невской губы была дополнена следующим адвективно-диффузионным уравнением для концентрации взвеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C(W - W_s)}{\partial \sigma} = \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[DA_H \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[DA_H \frac{\partial C}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где C – объемная концентрация взвешенных частиц; D – глубина водоема; t – время; x, y – горизонтальные координаты, U, V, W – компоненты вектора скорости течения; W_s – скорость гравитационного оседания частиц; K_H и A_H – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии, соответственно.

На свободной поверхности водоема (при $\sigma \rightarrow 0$) принималось условие равенства нулю потока взвешенного вещества:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} + W_s C = 0. \quad (2)$$

На дне (при $\sigma \rightarrow -1$) в модели была обеспечена возможность выбора одного из двух вариантов граничных условий: 1) задание потока взвешенного вещества [1]:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} + W_s C = W_s (C - C_a) \quad (3)$$

либо 2) задание непосредственно значения самой концентрации [7]:

$$C = \begin{cases} C_a, & \tau_b > \tau_{cr} \\ 0, & \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases}, \quad (4)$$

где τ_b – придонное сдвиговое напряжение, обусловленное совместным действием волн и течений; τ_{cr} – критическое значение сдвигового напряжения, при котором начинается процесс взмучивания; C_a – концентрация взвешенных частиц на нижнем отсчетном уровне.

Выполненные расчеты показали, что изменение нижнего граничного условия для концентрации частиц не приводит к заметным изменениям их поверхностной концентрации, однако различия в придонных концентрациях оказались существенными. Это вызвано отсутствием в (4) учета поступления частиц в придонный слой из вышележащих слоев за счет их оседания. Задание в качестве нижнего граничного условия потока взвешенного вещества в соответствии с (3) представляется более корректным. Именно он был использован во всех дальнейших расчетах.

Значение концентрации на отсчетном придонном уровне рассчитывалось по формуле [18]:

$$C_a = 0,015(1 - p_{clay})f_{silt} \left(\frac{d_{50}}{a} \right) \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}}, \quad (5)$$

где p_{clay} – доля глинистой фракции (< 8 мкм) в донных осадках; f_{silt} – иловый показатель; d_{50} – средний диаметр частиц; a – отсчетный уровень; $T = (\tau_b - \tau_{cr}) / \tau_{cr}$ и $D_* = d_{50} \left((\rho_s / \rho - 1) g \nu^{-2} \right)^{1/3}$ – безразмерные параметры придонного сдвигового напряжения и размера частиц соответственно; ρ_s – плотность частиц осадочного материала; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; ν – кинематическая вязкость воды. В настоящей работе доля глинистого материала в осадочных отложениях была принята равной 0.

Для вычисления илового показателя f_{silt} использовалась формула:

$$f_{silt} = \begin{cases} d_{sand} / d_{50}, & d_{50} \leq d_{sand} \\ 1, & d_{50} > d_{sand} \end{cases}, \quad (6)$$

где d_{sand} – отсчетный диаметр частиц песка, принимаемый равным 62 мкм.

Высота отсчетного уровня a , на котором задается нижнее граничное условие для уравнения переноса частиц (1), принималась равной половине высоты донных форм Δ_s [18]:

$$a = 0,5\Delta_s, \quad \Delta_s = f_{cs} d_{50} \{85 - 65 \tanh[0,015(\theta - 150)]\}, \quad (7)$$

где f_{cs} – эмпирический множитель; θ – параметр мобильности. Параметры f_{cs} и θ определялись по формулам:

$$f_{cs} = \begin{cases} (0,25d_{gravel} / d_{50})^{0,5}, & d_{50} > 0,25d_{gravel} \\ 1, & d_{50} \leq 0,25d_{gravel} \end{cases}, \quad \theta = \frac{u_{wc}^2}{(\rho_s / \rho - 1)gd_{50}}, \quad (8)$$

где $u_{wc}^2 = u_w^2 + u_c^2$, u_w – максимальная придонная волновая орбитальная скорость; u_c – придонная скорость течения, d_{gravel} – отсчетный диаметр частиц гравия, принимаемый равным 2000 мкм. Минимальное значение высоты отсчетного уровня a было принято равным 0,01 м.

2.2. Модель волнения

При моделировании процесса взмучивания донных частиц, особенно в прибрежных и мелководных районах, наряду с течением необходимо учитывать вклад ветрового волнения в формировании полей взвешенного осадочного вещества. Волны генерируют придонное сдвиговое напряжение, которое при штормовой погоде может значительно превосходить напряжение, созданное течением, тем самым определяя интенсивность процесса взмучивания.

Результирующее придонное сдвиговое напряжение в настоящей работе определялось как сумма напряжений, создаваемых течением и волнами [6]:

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bc}^2 + \tau_{bw}^2}, \quad (9)$$

где τ_{bc} и τ_{bw} — придонные сдвиговые напряжения, создаваемые течением и волнами, соответственно.

Придонное напряжение τ_{bc} , создаваемое течением, определялось в процессе расчета характеристик придонного пограничного слоя. Сдвиговое напряжение τ_{bw} вследствие волнения рассчитывалось по следующей методике [15]:

$$\tau_{bw} = \frac{1}{2} \rho f_w u_w^2, \quad u_w = \frac{\pi H_s}{T_p \sinh(kD)}, \quad k = \begin{cases} \omega_p^2 / g, & D / \lambda_\infty > 0,5 \\ \sqrt{\omega_p^2 / (gD)}, & D / \lambda_\infty < 0,05 \end{cases}, \quad (10)$$

где f_w – коэффициент волнового трения; u_w – придонная орбитальная волновая скорость; ω_p – частота максимума волнового спектра; T_p – пиковый период; H_s – эффективная высота волн; k – волновое число; $\lambda_\infty = gT_p^2 / (2\pi)$ – длина ветровой волны на глубокой воде. Фигурирующие в (10) характеристики волнения ω_p , T_p и H_s рассчитывались, исходя из спектра развитого волнения Пирсона-Московица [12, 10], по данным о скорости ветра U_{10} на стандартной высоте 10 м над водной поверхностью:

$$\omega_p = \frac{0,877g}{1,026U_{10}}, \quad T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}, \quad H_s = 0,22 \frac{U_{10}^2}{g}. \quad (11)$$

В том случае, когда имело место соотношение $0,05 \leq D/\lambda_\infty \leq 0,5$, волновое число определялось не по формуле (10), а из дисперсионного соотношения $\omega_p^2 = gk \tanh(kD)$, используя итерационный метод последовательных приближений. Относительная точность рассчитанного таким образом значения волнового числа k не превышает 10^{-4} .

В качестве коэффициента волнового трения f_w использовался максимальный из коэффициентов трения для случаев гладкого и шероховатого дна:

$$f_w = \max\{f_{wr}, f_{ws}\}, \quad f_{wr} = 0,237r^{-0,52}, \quad f_{ws} = B \text{Re}_w^{-N}, \quad (12)$$

где f_{wr} – коэффициент волнового трения при шероховатом дне; f_{ws} – коэффициент волнового трения при гладком дне; $r = A/k_s$ – относительная шероховатость; $\text{Re}_w = u_w A/\nu$ – число Рейнольдса; $A = u_w T_p / (2\pi)$ – полуорбитальное смещение; $k_s = 2,5d_{50}$ – размер шероховатости Никурадзе; $B = 2$ и $N = 0,5$ при $\text{Re}_w \leq 5 \times 10^5$; $B = 0,0521$ и $N = 0,187$ при $\text{Re}_w > 5 \times 10^5$.

Воздействие волнения не учитывалось, если в результате расчетов эффективная высота волн оказывалась меньше 10 см.

2.3. Определение основных характеристик донных частиц в Невской губе

Основными характеристиками частиц, которые необходимо знать при моделировании взмучивания донных осадков, являются их плотность ρ_s , диаметр d_{50} , скорость гравитационного оседания W_s , а также критическое значение придонного сдвигового напряжения τ_{cr} , при котором начинается отрыв частиц от дна. Если донные осадки не являются однородными в исследуемой акватории, то необходимо учитывать пространственное распределение частиц с различными свойствами, так как от этого будет зависеть, с какой интенсивностью в том или ином районе будет происходить процесс взмучивания. Это подтверждается результатами проведенных численных экспериментов, в которых для всей акватории Невской губы и восточной части Финского залива задавалась только одна фракция донных частиц. Расчеты показали, что в том случае, когда все дно предполагается песчаным, интенсивное взмучивание при сильном ветре имеет место лишь в узкой прибрежной зоне и практически отсутствует в центральной части Невской губы и в других районах. Горизонтальный перенос взмученных частиц песка оказался незначительным, что обусловлено большой

скоростью гравитационного оседания частиц песка и малыми глубинами в прибрежной зоне. В случае же полностью илистого дна полученное решение характеризовалось сильно завышенными концентрациями взвеси практически всюду и интенсивным выносом частиц ила из Невской губы через ворота комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений. Если бы подобное происходило в реальных условиях, то частицы ила сравнительно быстро вымывались бы со дна Невской губы и уносились в Финский залив.

С целью выявить основные закономерности в развитии процесса взмучивания в различных областях Невской губы в настоящей работе было сделано предположение, что донные осадки состоят из двух фракций частиц: песков и илов. Выделение в модели двух фракций донных осадков с сильно различающимися характеристиками частиц основано на наблюдаемом пространственном распределении осадочного материала в Невской губе. Использование литологической карты позволило выделить области дна, характеризующиеся преобладанием в донных осадках песчаной или иловой составляющей (рис. 1).

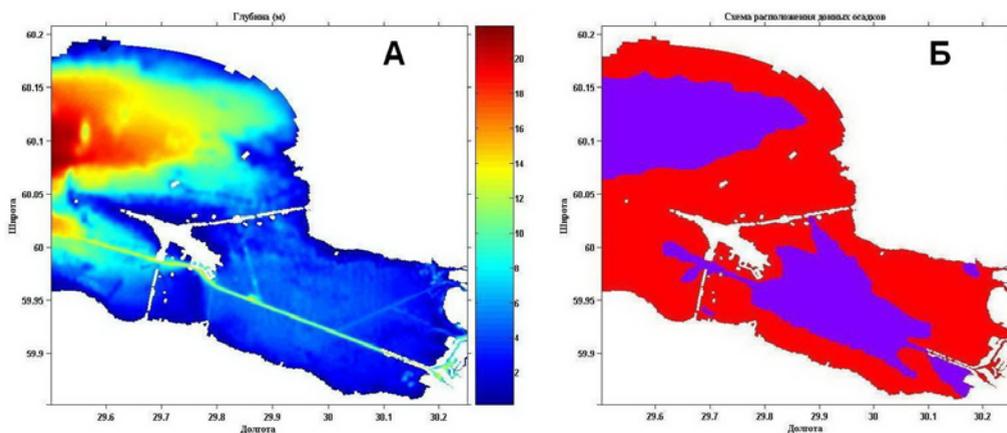


Рис. 1. Карта глубин (А) и схема пространственного распределения донных осадков (Б) в Невской губе. На схеме (Б) красным цветом обозначены пески, фиолетовым – илы

Согласно результатам натурных наблюдений, проведенных ФГУНПП «Севморгео», плотность песчаных донных осадков в Невской губе в среднем колеблется от 1900 до 2080 кг/м³, иловых осадков – от 1190 до 1400 кг/м³. В качестве характерного диаметра для частиц песка и ила были заданы значения 110 и 9 мкм, соответствующие осредненным значениям реальным размерам частиц песка и ила в Невской губе. Плотность самих частиц песка, согласно наблюдениям, принималась равной 2370 кг/м³, частиц ила – 2000 кг/м³.

Насколько известно авторам, натурные измерения скорости гравитационного оседания частиц, а также критического значения придонного сдвигового напряжения, в Невской губе не проводились. Поэтому эти параметры были определены по аналитическим зависимостям, а также с использованием данных

натурных наблюдений в других акваториях. Скорость гравитационного опускания частиц W_s рассчитывалась в зависимости от размера частиц по следующим формулам. Для частиц с диаметрами, меньшими 100 мкм, использовалось соотношение [16]:

$$W_s = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50}^2 \nu^{-1}, \quad (13)$$

для частиц с диаметрами от 100 до 1000 мкм — формула [19]:

$$W_s = 10 \frac{\nu}{d_{50}} \left\{ \left[1 + 0,01 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50}^3 \nu^{-2} \right]^{0,5} - 1 \right\}. \quad (14)$$

Согласно (13)–(14), значения скорости оседания частиц песка (110 мкм) и ила (9 мкм) в Невской губе составляют 7,48 и 0,04 мм/с, соответственно.

Для определения критического значения придонного напряжения чаще всего используется кривая Шилдса [14]. Эта кривая связывает безразмерный параметр размера частиц D_* и безразмерное критическое значение параметра мобильности частиц θ_{cr} , определяемое по формуле:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho) g d_{50}}. \quad (15)$$

Однако использование кривой Шилдса для донных осадков с мелкозернистой фракцией частиц (менее 500 мкм) может привести к неточным оценкам критического напряжения τ_{cr} [17]. Поэтому в настоящей работе использовались более точные зависимости для параметра мобильности [8]:

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0,115(D_*)^{-0,5}, & D_* < 4 \\ 0,14(D_*)^{-0,64}, & 4 \leq D_* < 10 \end{cases}. \quad (16)$$

Вычисленные значения безразмерного параметра частиц D_* составили для песчаных частиц 2,58, для частиц ила 0,19. Соответствующие им критические значения придонного напряжения, рассчитанные по формулам (15) и (16), составили для частиц песка 0,104 Н/м², для частиц ила 0,023 Н/м².

В естественных условиях для очень мелких частиц донных осадков нередко наблюдается когезия, т. е. большая сплоченность частиц между собой вследствие наличия связывающих элементов, таких как глина и/или органическое вещество. Это приводит к тому, что сила, необходимая для взмучивания их со дна, не уменьшается с уменьшением их диаметра, а возрастает. Использование результатов различных натурных наблюдений, связывающих размер частиц с необходимым для их отрыва от дна значением придонного напряжения [17],

позволило определить критическое значение напряжения для иловых осадков. Это значение составило $0,25 \text{ Н/м}^2$, что на порядок превышает приведенное выше значение, рассчитанное по формулам (15) и (16), не учитывающим когезию. В случае песка когезия, как правило, не наблюдается. Использование результатов натуральных наблюдений [17] и формул (15) и (16) дало практические одинаковые оценки критического придонного напряжения для частиц песка. Поэтому в настоящей работе при расчетах критическое значение придонного напряжения задавалось равным $0,104 \text{ Н/м}^2$ для частиц песка и варьировалось в пределах от $0,023 \text{ Н/м}^2$ до $0,25 \text{ Н/м}^2$ для частиц ила с целью определить чувствительность полученной модели к выбору значения данной величины.

3. Результаты расчетов концентрации взвешенных частиц в Невской губе

Численные эксперименты проводились для периода 27 мая – 2 июня 2006 г., для которого есть данные наблюдений за мутностью в Невской губе. Необходимая метеорологическая информация (скорость и направление ветра, приземное атмосферное давление, облачность, температура и влажность воздуха) задавалась согласно фактическим данным метеостанции Санкт-Петербург. На восточной границе модельной области задавался расход Невы для данного времени года, соответствующим образом разделенный по ее рукавам. Полный расход Невы и температура ее воды задавались по среднемесячным многолетним данным. Соленость и концентрация взвеси полагались равными нулю. На западной границе модельной области задавалось изменение уровня по данным станции Кронштадт, при этом скорости течений рассчитывались с использованием условия излучения Орланского [11]. Для температуры, солености и концентрации взвешенного вещества вследствие отсутствия данных наблюдений использовались значения из соседних узлов внутри расчетной области. В начальный момент времени скорости течения и концентрация взвешенных частиц в модельной области задавались равными нулю, поля солености и температуры задавались однородными.

Согласно результатам расчетов, максимальная высота ветровых волн в Невской губе за указанный период в отдельные моменты составляет $0,5\text{--}0,6 \text{ м}$, при этом большую часть времени высота волн лежит в диапазоне от $0,2$ до $0,3 \text{ м}$.

Рассчитанное придонное напряжение трения, создаваемое течением, по величине меньше напряжения, создаваемого волнением, и проявляется главным образом в районах с высокими скоростями течения: в устье Невы и в створах КЗС, а также в мелководном районе к югу от острова Котлин. Обычно его величина составляет $0,3\text{--}0,5 \text{ Н/м}^2$. Лишь при значительных перепадах уровня в окрестностях ворот КЗС возникают сильные течения, генерирующие более значительные придонные сдвиговые напряжения, в отдельные моменты времени достигающие $0,8\text{--}1,5 \text{ Н/м}^2$ и более. На остальной акватории Невской губы ветровое волнение вносит более существенный вклад в суммарное придонное напряже-

ние, максимальные значения которого при сильном волнении наблюдаются в мелководных районах вдоль всего побережья Невской губы и о. Котлин, а также в уже отмеченном мелководном районе к югу от Кронштадта, составляя в среднем при наличии волнения $0,4-0,6 \text{ Н/м}^2$ и достигая в отдельные моменты времени в узкой полосе у самого побережья $1,5-2,0 \text{ Н/м}^2$.

С целью выяснения чувствительности решения к выбору значения критического придонного сдвигового напряжения τ_{cr} был выполнен ряд численных экспериментов с заданием значений напряжения τ_{cr} для частиц ила, полученных как по соотношениям (15) и (16), так и снятых с графика, построенного по результатам натуральных наблюдений [17]. Значение τ_{cr} для частиц песка во всех расчетах принималось равным $0,104 \text{ Н/м}^2$.

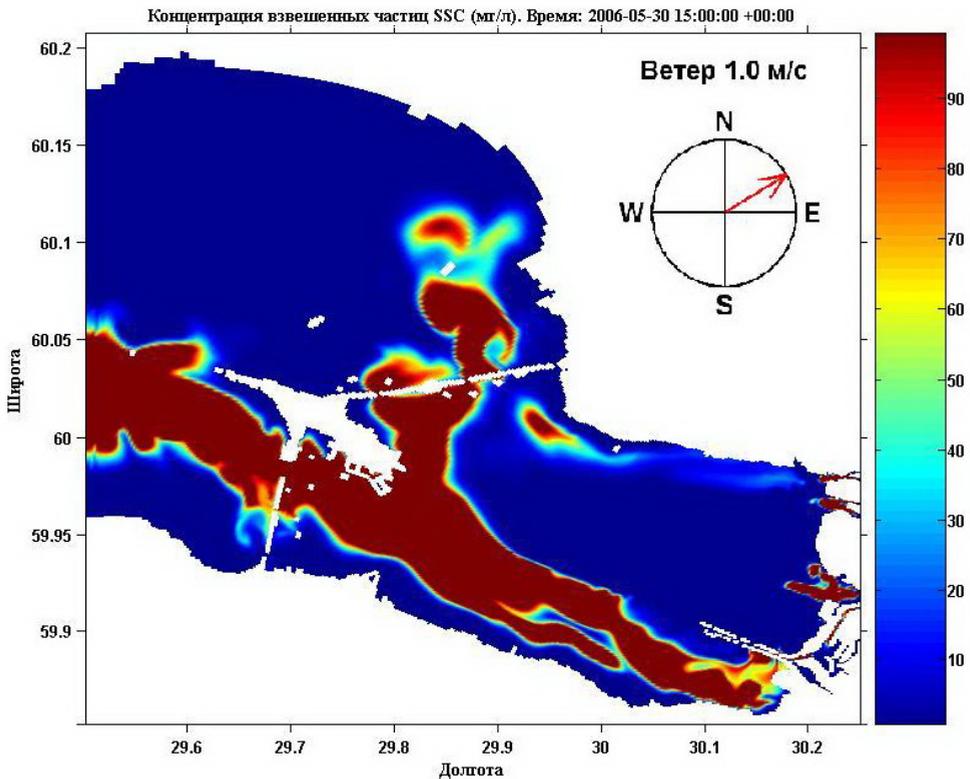


Рис. 2. Пространственное распределение суммарной придонной концентрации взвешенных частиц при $\tau_{cr} = 0,023 \text{ Н/м}^2$ для частиц ила и $\tau_{cr} = 0,104 \text{ Н/м}^2$ для частиц песка

Согласно результатам расчетов, при $\tau_{cr} = 0,023 \text{ Н/м}^2$ для частиц ила (рис. 2) в наибольшей степени взмучиванию подвержены иловые донные отложения, расположенные в центральной части Невской губы, а также в небольшом юго-восточном районе акватории, к юго-западу от Санкт-Петербурга. Взмучивание

частиц песочной фракции происходит, главным образом, вдоль побережья в периоды сильного волнения, когда придонные динамические скорости возрастают, а также в районе к югу от о. Котлин и в устье Невы, где сток реки приводит к значительным придонным скоростям течения. Анализ вертикальной структуры поля концентрации взвеси показывает, что в районах с песчаными донными осадками значительные концентрации взвеси отмечаются в придонном слое. В то же время в районах с иловыми донными осадками концентрация взвеси распределена по вертикали более однородно, что объясняется меньшей скоростью гравитационного опускания иловых частиц по сравнению с частицами песка. Вынос взвешенного вещества из Невской губы происходит через водопропускные и судопропускные сооружения КЗС, причем наиболее интенсивно этот процесс происходит через судопропускное сооружение С1 и водопропускные сооружения В3 и В4. Вынесенная из Невской губы взвесь частиц, в основном состоящая из частиц ила, со временем оседает на дно. При этом формируется вертикальный профиль концентрации, обратный по отношению к существующему в Невской губе – концентрация с глубиной уменьшается, а не растет. Формирование подобного профиля объясняется тем, что к западу от КЗС глубина водоема увеличивается, взмучивание донных отложений уменьшается, и единственным источником взвеси становится ее поток из Невской губы в верхних слоях водоема.

Во втором численном эксперименте (рис. 3) для частиц ила задавалось критическое напряжение, равное $\tau_{cr} = 0,25 \text{ Н/м}^2$. В этом случае рассчитанное поле концентрации взвеси формируется, главным образом, концентрацией частиц песка, так как частицы ила практически не взмучиваются. Значения концентрации взвеси оказались на порядок меньше тех, что были получены в первом численном эксперименте. Как и раньше, повышенные концентрации взвешенных частиц песка отмечаются в дельте Невы. При значительном волнении взмучиванию также подвержена вся вдольбереговая мелководная зона и район к югу от о. Котлин. Характерным отличием результатов данного численного эксперимента от предыдущего является то, что в данном случае практически не наблюдается горизонтального переноса взвешенного вещества по акватории Невской губы и его выноса за ее пределы. Это объясняется тем, что взмучиванию теперь подвержены преимущественно песочные донные отложения, имеющие большую скорость гравитационного оседания, что вкуче с малыми глубинами вдольбереговой полосы приводит к оседанию частиц песка практически в тех же районах, где они были оторваны от дна и переведены во взвешенное состояние. В результате появляются резкие перепады в поле суммарной концентрации взвеси там, где проходит граница между областями с песчаными и иловыми донными отложениями.

Как показывают результаты рассмотренных выше двух численных экспериментов, использованные в них значения τ_{cr} для частиц ила приводят к тому, что либо со дна поступает слишком большое количество илового осадочного

материала либо иловые частицы практически не взмучиваются, и поле суммарной концентрации взвеси формируется, главным образом, концентрацией частиц песка. С целью приближения результатов моделирования к реальной ситуации в рамках настоящей работы был выполнен ряд численных экспериментов, в которых величина критического напряжения для частиц ила варьировалась в пределах от $0,023 \text{ Н/м}^2$ до $0,25 \text{ Н/м}^2$. Всего было выполнено 7 экспериментов со следующими значениями критического придонного напряжения для частиц ила: $0,023$; $0,06$; $0,08$; $0,10$; $0,12$; $0,14$ и $0,25 \text{ Н/м}^2$. Наилучшее согласование модельных результатов, как качественное, так и количественное, с результатами натуральных наблюдений дал эксперимент, в котором задавалась величина критического напряжения для ила, равная $0,06 \text{ Н/м}^2$ (рис. 4).

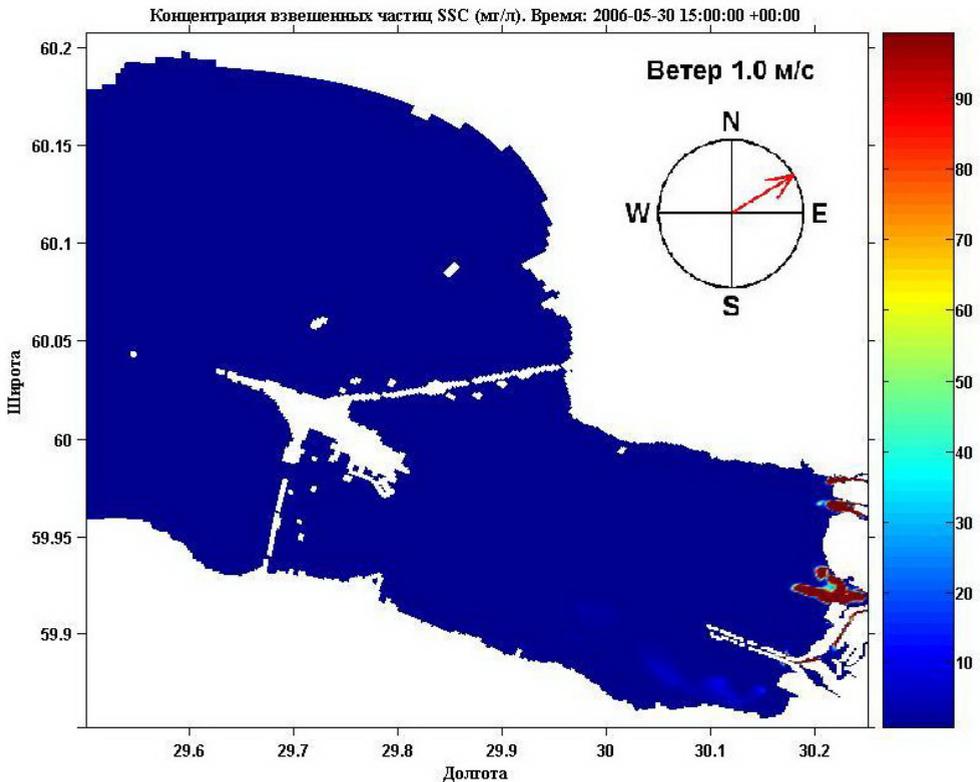


Рис. 3. Пространственное распределение суммарной придонной концентрации взвешенных частиц при $\tau_{cr} = 0,25 \text{ Н/м}^2$ для частиц ила и $\tau_{cr} = 0,104 \text{ Н/м}^2$ для частиц песка

Прямое сравнение результатов расчетов с данными непосредственных измерений концентрации минеральной взвеси в Невской губе невозможно из-за отсутствия последних. На рис. 5 представлена карта придонной мутности, полученная по результатам экспедиции ФГУНПП «Севморгео» в мае–июне 2006 г. Указанные единицы измерения (FTU) на рис. 5 в данном случае примерно соот-

ветствуют придонной концентрации в мг/л.

Следует отметить, что повышенные значения придонной мутности на рис. 5 были вызваны не только естественным взмучиванием донных осадков, но и проводимыми в тот период гидротехническими работами в Невской губе. В выполненных расчетах подобные искусственные источники взвешенного вещества никак не были учтены, поэтому говорить о полном соответствии результатов модельных расчетов с данными натурных наблюдений не приходится. Натурные наблюдения за мутностью позволяют лишь говорить о суммарном содержании взеси в воде, а не о той ее части, которая была вызвана естественным взмучиванием со дна. На результаты наблюдений, помимо гидротехнических работ, влияет также взвешенное вещество, выносимое со стоком Невы, а также присутствие в воде органического вещества. Все эти факторы значительно затрудняют определение доли концентрации взвешенных частиц, возникающей вследствие непосредственного взмучивания минеральных частиц со дна. Представляется, что решить эту задачу можно будет при наличии данных наблюдений за период, когда доля взеси, поступающей в воду в результате промышленного выброса и проведения гидротехнических работ, будет минимальной.

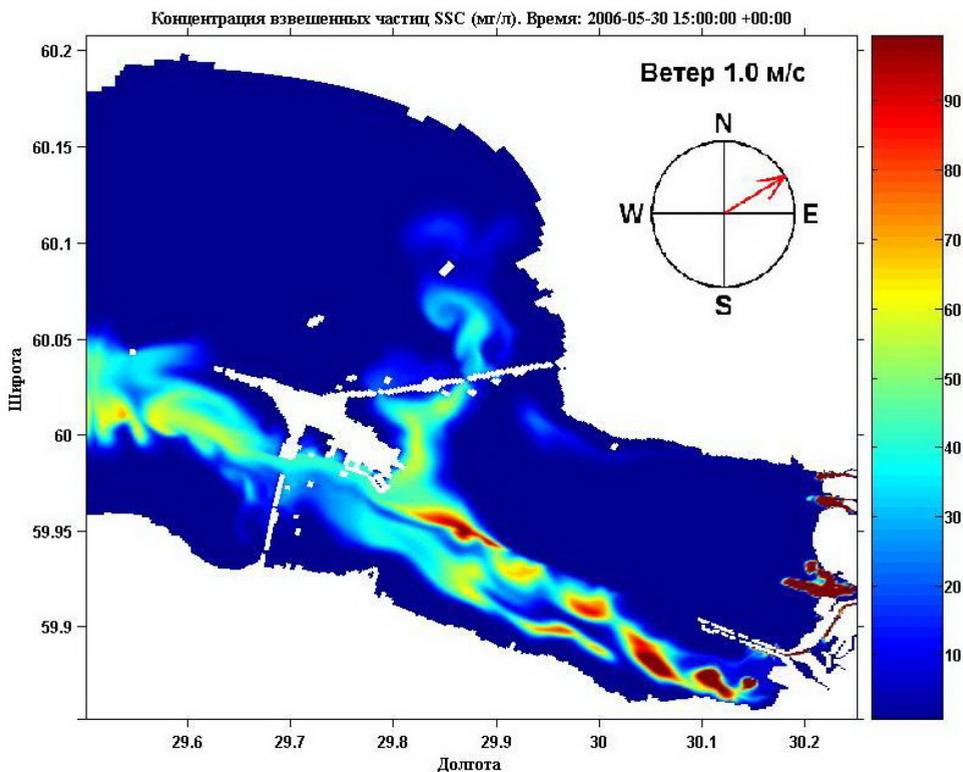


Рис. 4. Пространственное распределение суммарной придонной концентрации взвешенных частиц при $\tau_{cr} = 0,06 \text{ Н/м}^2$ для частиц ила и $\tau_{cr} = 0,104 \text{ Н/м}^2$ для частиц песка

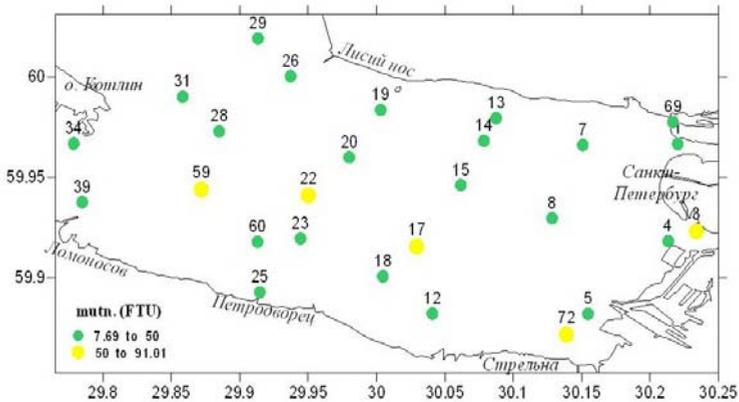


Рис. 5. Значения мутности в придонной воде Невской губы по результатам экспедиции ФГУНПП «Севморгео» 30 мая–2 июня 2006 г.

4. Заключение

Трехмерная гидродинамическая модель Невской губы была дополнена блоком, описывающим процесс взмучивания и переноса донных частиц, и блоком для определения характеристик волнения и вызванного им придонного напряжения трения. Дно исследуемой акватории было разделено на области с преобладанием частиц песчаной или иловой фракции. Плотность и диаметр донных частиц задавались в модели в соответствии с натурными наблюдениями. Скорость гравитационного оседания и критические значения придонного сдвигового напряжения, необходимые для отрыва частиц от дна, определялись с использованием как различных аналитических зависимостей, так и опубликованных ранее данных натурных наблюдений для частиц со схожими характеристиками. Модельные расчеты проводились для периода 27 мая–2 июня 2006 г. с заданием различных значений критического напряжения для частиц ила и неизменного критического напряжения для частиц песка.

Полученные результаты позволяют сказать, что взмучивание донных частиц в Невской губе определяется главным образом ветровым волнением. Вклад течения в процесс взмучивания значительно меньше и проявляется главным образом в створах КЗС в те периоды, когда там возникают значительные скорости потока, а также в устье Невы и в мелководном районе к югу от о. Котлин. Расчеты показали, что в наибольшей степени взмучиванию подвержены песчаные осадки, расположенные вдоль берегов на мелководье, а также иловые осадки, расположенные в центральной части Невской губы и в юго-восточном районе Невской губы к юго-западу от Санкт-Петербурга. Вертикальные профили концентрации частиц песка имеют максимумы в придонном слое, выше которого концентрации заметно уменьшаются, в то время как профили концентрации частиц ила более однородны по вертикали.

Разработанная модель взмучивания и переноса донных отложений может

использоваться при прогнозе распространения взвешенного вещества и загрязняющих веществ на акватории Невской губы.

Литература

1. *Каган Б.А., Неелов И.А.* Моделирование придонного пограничного слоя в двухфазном осциллирующем потоке // *Океанология. Доклады Академии наук*, 1994, т. 339, № 6, с. 812–815.
2. *Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Лыскова У.С.* Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // *Изв. Русского географического общества*, 2006, т. 138, № 5, с. 48–57.
3. *Blaas, M., Dong, C., Marchesiello, P., McWilliams, J.C., Stolzenbach, K.D.* Sediment transport modeling on Southern Californian shelves: A ROMS case study. – *Cont. Shelf Res.*, 2007, 27, 832–853.
4. *Blumberg, A.F., Mellor, G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. – In: *Heaps, N., ed., Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Sci.*, 1987, 4, 1–16.
5. *Klevanny, K.A., Smirnova, E.V.* Simulation of current and water pollution changes in the Neva Bay after completion of St. Petersburg flood protection barrier. – *2002, Envir. and chem. physics*, 24, 3, 144–150.
6. *Lee, C.H., Schwab, D.J., Hawley, N.* Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan. – *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, 3004, doi: 10.1029/2004JC002326.
7. *Lou, J., Schwab, D.J., Beletsky, D., Hawley, N.* A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan. – *J. Geophys. Res.*, 2000, 105, 6591–6610.
8. *Miller, M. C., Mc Cave, I. N., Komar, P. D.* Threshold of sediment motion under unidirectional current. – *Sedimentology*, 1977, 24, 507–527.
9. *Molchanov, M., Eremina, T., Neelov, I.* Modeling of suspended matter transport in the Neva Bay and the Eastern part of the Gulf of Finland. – *Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of coastal zone of non-tidal seas*, 2010, 207–211.
10. *Moskowitz, L.* Estimates of the power spectrums for fully developed seas for wind speeds of 20 to 40 knots. – *J. Geophys. Res.*, 1964, 69, 5161–5179.
11. *Orlanski, I.* A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. – *J. Comp. Phys.*, 1976, 21, 251–269.
12. *Pierson, W. J.* The interpretation of wave spectrum in terms of the wind profile instead of the wind measured at a constant height. – *J. Geophys. Res.*, 1964, 69, 5191–5203.
13. *Pleskachevsky, A., Gunther, H.* Modeling of suspended particulate matter transport in coastal areas. – *US/EU-Baltic International Symposium*, 2008, IEEE/OES.
14. *Shields, A.* Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. – *Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau*, 26, 26, 1936. (English translation by W. P. Ott and J. C. van Uchelen, 36 pp., U.S. Dep. of Agric. Soil Conser. Serv. Coop. Lab., Calif., Inst. of Technol., Pasadena, 1936).
15. *Solsby, R.* Dynamics of marine sands. A manual for practical application. – *Tomas Telford Services*, London, 1997.
16. *Van Rijn, L.C.* Sediment transport, Part II: Suspended load transport. – *J. Hydraul. Eng.*, 1984, 110, No. 11, 1613–1641.
17. *Van Rijn, L.C.* Unified view of sediment transport by currents and waves. I - Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. – *J. Hydraul. Eng.*, 2007, 133, No. 6, 649–667.
18. *Van Rijn, L.C.* Unified view of sediment transport by currents and waves. II – Suspended transport. – *J. Hydraul. Eng.*, 2007, 133, No. 6, 668–689.
19. *Zanke, U.* Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten. – *Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau*, 1977, Heft 46, Seite 243, Technical University, Hannover, West Deutschland.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1758 от 30 сентября 2009 г.) по направлению «Океанология».