

УДК 551.463.8

© С.Д.Мартыянов¹, В.А.Рябченко², 2013¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург²Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

vla-ryabchenko@yandex.ru

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВЗМУЧИВАНИЯ И ПЕРЕНОСА ДОННЫХ ОСАДКОВ В НЕВСКОЙ ГУБЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ

Трехмерная модель Невской губы, описывающая процессы взмучивания донных и переноса взвешенных осадков, дополнена включением в нее переменной скорости гравитационного опускания взвешенных частиц и новой методики расчета суммарного придонного напряжения за счет течений и ветровых волн. При расчете критического придонного напряжения учитываются эффекты когезии. Ветровое волнение рассчитывается по модели SWAN. Наилучшее соответствие между спутниковыми и модельными данными о концентрации взвешенных частиц достигается при задании коэффициента поправки на когезию донных иловых осадков, равного 1.5, а также нулевого и 10 %-ного содержания глины соответственно в песчаных и иловых осадках.

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

Одной из основных характеристик, регулирующих интенсивность взмучивания донных осадков, является критическое придонное сдвиговое напряжение, зависящее от типа донных частиц. Взмучивание донных осадков происходит при превышении придонным сдвиговым напряжением его некоторой критической величины, различной для разного типа донных осадков. Придонное сдвиговое напряжение, в свою очередь, определяется взаимодействием придонных пограничных слоев, формируемых течениями и волнением. В естественных условиях, как правило, это взаимодействие носит нелинейный характер [1–3]. По имеющимся натурным данным о переносе взвешенного вещества было установлено [4], что в мелководных районах при наличии значительного волнения и относительно небольших скоростях течения общее количество переносимой взвеси может увеличиваться на 1–2 порядка вследствие существенного вклада волн в придонное напряжение, регулирующее поток осадочного вещества со дна в вышележащие слои воды. Однако, хотя при значительных скоростях ветра в прибрежных и мелководных районах вклад волнения и является доминирующим [5–8], в общем случае необходимо учитывать оба механизма генерации суммарного придонного напряжения [3, 6].

На критическое придонное напряжение оказывает влияние как величина физических характеристик самих частиц донных осадков, так и наличие в донных осадках мелкодисперсных и органических составляющих. Первыми и получившими наибольшее распространение являются экспериментальные результаты Шилдса [9], позволяющие по параметрам потока и характеристикам частиц определить критическое напряжение, при котором начинается движение частиц. Позднее были предложены другие эмпирические зависимости, дающие более точные оценки критического напряжения, в том числе и для мелкозернистых частиц песка [10]. Дальнейшее уточнение значений критического напряжения возможно при включении в рассмотрение наличия глинистого и органического материала в донных осадках. Результаты натурных наблюдений [11] позволяют сделать вывод, что когезия (сцепление частиц) донных осадков в случае частиц песка (диа-

метром более 62 мкм) вызвана наличием в песчаных осадках глинистого материала, что приводит к обволакиванию частиц песка тонким слоем глины. Когезия способствует увеличению критического напряжения, необходимого для отрыва частиц от дна. Результаты экспериментов с частицами диаметром менее 62 мкм [12] показали, что, начиная приблизительно с этого диаметра, дальнейшее уменьшение размера частиц приводит к росту критического напряжения, что объясняется усилением когезии [13].

Согласно данным натурных наблюдений за концентрацией взвеси в устьях некоторых китайских рек [14–16], при нахождении в воде во взвешенном состоянии частиц малого диаметра (менее 32 мкм) часто наблюдается их слипание, или флокуляция, наиболее интенсивное в соленой и солоноватой воде. Схожий процесс также наблюдался в устьях рек Амазонки [17] и Северн [18]. Флокуляция приводит к увеличению эффективного диаметра частиц, что требует введения поправки при расчете скорости опускания взвеси.

Помимо влияния флокуляции на скорость опускания частиц, экспериментально установлено, что высокие концентрации взвешенного вещества приводят к невозможности свободно опускаться частицам взвеси вниз под действием силы тяжести, а испытывают на себе затормаживающее воздействие окружающих частиц. В настоящее время предложено несколько эмпирических зависимостей, позволяющих учесть указанный эффект и его влияние на скорость гравитационного опускания [19–21]. Однако сравнительный анализ этих зависимостей показывает, что в целом они дают близкие результаты [4].

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования процесса взмучивания донных и переноса взвешенных осадков на примере Невской губы (рис.1). Невская губа расположена в восточной части Финского залива. Ее длина от устья р.Невы до Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) составляет 21 км, максимальная ширина – около 15 км. Средняя глубина Невской губы равна приблизительно 3 м, при этом максимальная естественная глубина не превышает 5–6 м. Воды Невской губы практически пресные, с соленостью, как правило, менее 1 ‰, что обусловлено пресноводным стоком р.Невы [22, 23].



Рис.1. Положение исследуемой акватории в восточной части Финского залива.

Настоящая работа является продолжением и развитием исследований, проведенных ранее [24], и отличается от них прежде всего учетом в донных осадках наряду с песчаной, иловой и глинистой фракциями. В модели использована усовершенствованная методика расчета суммарного придонного напряжения с учетом нелинейного взаимодействия течения и волнения. Введена также зависящая от концентрации взвеси переменная скорость гравитационного опускания для каждого типа частиц, расчет которой допускает, при определенных условиях, возможность флокуляции взвешенных частиц. Еще одна модификация модели состоит в использовании более точной методики расчета критических значений придонных напряжений (отдельно для каждой фракции донных частиц). Наконец, наиболее суще-

ственным усовершенствованием является использование модели SWAN (Simulating Waves Nearshore) [25] – одной из лучших моделей ветрового волнения в прибрежных районах и мелководных водоемах [26–28], к которым относится Невская губа.

Методы. Модификации модели взмучивания и переноса донных осадков. В работе используется трехмерная модель Невской губы [29], основанная на модели общей циркуляции океана Принстонского университета (Princeton Ocean Model – POM) [30]. В вертикальном направлении модель имеет семь равномерных σ -уровней. В горизонтальной плоскости используется криволинейная квазиортогональная расчетная сетка 350×182 узла с минимальным разрешением 60–70 м и максимальным – около 1 км. Модель приводится в движение атмосферными воздействиями, включающими скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха в приводном слое атмосферы, балл облачности и давление на уровне моря, а также колебаниями уровня на открытой западной границе расчетной области и речным стоком Невы на восточной границе. В [24] модель была расширена путем включения в нее дополнительных блоков для расчета взмучивания и последующего переноса двух типов донных осадков – песков и илов, характеризующихся различной плотностью и размером частиц. Распределение концентрации взвешенных частиц каждой из этих фракций в модельной области рассчитывается путем решения отдельного адвективно-диффузионного уравнения.

В настоящей работе модель [24] была модифицирована в следующих отношениях. Согласно [13], результирующее критическое придонное напряжение τ_{cr} для каждого типа донных осадков, при котором начинается движение частиц, вычисляется теперь с поправками на когезию (φ_{coh}), возможность более уплотненной упаковки частиц (φ_{pack}) и наличие органического материала (φ_{bio}), т.е.

$$\tau_{cr} = \varphi_{coh} \varphi_{pack} \varphi_{bio} \tau_{cr,0}, \quad (1)$$

где $\tau_{cr,0}$ – критическое донное напряжение без поправок, Н/м².

В выполненных модельных расчетах поправка φ_{bio} принята равной единице из-за отсутствия данных о содержании органического материала в донных осадках Невской губы. Поправка на когезию φ_{coh} в выражении (1) рассчитывалась по следующим соотношениям в зависимости от среднего диаметра частиц d_{50} для каждой из двух фракций донных осадков [13]:

$$\varphi_{coh} = \begin{cases} (1 + p_{cs})^3, & d_{50} \geq d_{sand} \\ (d_{sand}/d_{50})^\gamma, & d_{50} < d_{sand} \end{cases}, \quad (2)$$

где p_{cs} – доля глинистого материала; d_{sand} – отсчетный диаметр частиц песка, принимаемый равным 62 мкм; γ – эмпирический коэффициент, значение которого будет определено по результатам расчетов.

Поправка на уплотненность φ_{pack} , вводимая лишь для частиц диаметром менее 62 мкм, рассчитывалась по формуле [13]:

$$\varphi_{pack} = C_{gel}/C_{gel,s}, \quad (3)$$

где C_{gel} – гелевая объемная концентрация (промежуточная между концентрацией в случае затрудненного опускания частиц у дна и концентрацией консолидированных донных осадков); $C_{gel,s}$ – максимальная объемная концентрация частиц песка в донных песчаных

осадках (доля объема частиц песка в общем объеме); $C_{gel,s} = (1 - \eta) = 0.65$, где η – пористость песчаных донных осадков (примерно 0.35 для чистых песков). Концентрация C_{gel} вычисляется по формуле

$$C_{gel} = (d_{50}/d_{sand})^\alpha C_{gel,s} \quad C_{gel} \geq 0.05, \quad (4)$$

где α – эмпирический коэффициент, принимаемый равным единице. Для частиц диаметром $d_{50} \geq d_{sand}$ (пески) поправка $\varphi_{pack} = 1$.

Еще одна модификация модели – переменная скорость гравитационного опускания частиц W_s , которая вводится посредством использования поправок на флокуляцию (φ_{floc}) и затрудненное оседание (φ_{hs}) [4], рассчитываемых на каждом временном шаге

$$W_s = \varphi_{floc} \varphi_{hs} W_{s0}, \quad (5)$$

где W_{s0} – скорость опускания единичной частицы в чистой воде, м/с. Скорость опускания W_s рассчитывается отдельно для взвешенных песков и илов с соответствующими объемными концентрациями C_1 и C_2 .

Для взвешенных частиц песка ($d_{50} \geq d_{sand}$) эффект флокуляции не учитывался ($\varphi_{floc} = 1$). Для взвешенных частиц ила ($d_{50} < d_{sand}$) и при солёности окружающей воды S выше 5 ‰ в модели принимался во внимание эффект флокуляции

$$\varphi_{floc} = [4 + \lg(2C_2/C_{gel})]^\beta, \quad \varphi_{floc} = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi_{floc} < 1 \\ 10 & \text{при } \varphi_{floc} > 10 \end{cases}, \quad (6)$$

где C_2 – объемная концентрация взвеси с диаметром частиц менее 62 мкм (илы); $\beta = (d_{sand}/d_{50} - 1)$ – эмпирический коэффициент, $0 \leq \beta \leq 3$. При солёности $S < 5$ ‰ эффект флокуляции для частиц ила также не учитывался ($\varphi_{floc} = 1$). Образующиеся в результате слипания взвешенных частиц агрегированные комплексы большего диаметра в виде рыхлых хлопьевидных скоплений, называемые флокулами, как правило, имеют более низкую плотность и более высокую скорость опускания, чем отдельные мелкие частицы. В результате увеличение концентрации взвеси при наличии флокуляции приводит к увеличению скорости ее опускания. Минимальное значение скорости опускания флокул в солёной воде принимается равным 0.2 мм/с [4].

Коэффициент φ_{hs} , учитывающий эффект затрудненного опускания вследствие замедляющего влияния соседних частиц, рассчитывался для всех типов взвешенных частиц по формуле

$$\varphi_{hs} = (1 - C_{total})^n, \quad (7)$$

где $C_{total} = C_1 + C_2$ – суммарная объемная концентрация взвеси; C_1 – объемная концентрация взвешенных частиц песка ($d_{50} \geq d_{sand}$); C_2 – объемная концентрация взвешенных частиц ила ($d_{50} < d_{sand}$); n – эмпирический параметр, принимаемый равным 5 [19]. Эта поправка для скорости опускания взвешенного вещества неявно учитывает и влияние концентрации взвеси на вязкость жидкости [4].

Расчет параметров ветрового волнения. Для расчета параметров ветрового волнения в настоящей работе использовалась модель ветрового волнения SWAN (версия

SWAN 40.85), специально разработанная для описания волн в мелководных прибрежных районах со сложной конфигурацией береговой линии [25, 26]. Модель основана на уравнении баланса спектральной плотности волнового действия и позволяет учитывать в расчетах воздействие ветра, обрушение волн на мелководье, рефракцию волн, наличие течения, придонное трение, образование барашков и нелинейное волновое взаимодействие (квадрупольное и трехволновое). В последних версиях модели добавлена возможность учитывать дифракцию, наличие подсеточных препятствий, подъем уровня воды вследствие нелинейного взаимодействия волн, а также диссипацию волновой энергии вследствие наличия в воде растительности.

Расчеты были выполнены на той же криволинейной квазиортогональной сетке в сферической системе координат, которая использовалась в модели циркуляции [29]. Модель SWAN работала в нестационарном режиме с шагом по времени 10 мин. В расчетах использовалась неявная численная схема BSBT, позволяющая для нестационарного режима задавать крупные шаги по времени для сокращения общего времени счета. Вычисления распараллеливались по стандарту OpenMP для реализации на четырехъядерном процессоре Intel Core i5-2400. Для выхода из режима итераций, который реализовался на каждом временном шаге, использовались следующие условия [25, 26]: 1) различие между локальными высотами значительных волн для двух последовательных итераций не превышает 2 %, или тех же 2 % от средней по акватории высоты значительных волн; 2) различие между локальными средними волновыми периодами для двух последовательных итераций не превышает 2 %, или 2 % от осредненного по акватории среднего волнового периода; 3) условия 1 и 2 выполнены в более чем 98 % расчетных точек.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в описании модели [26] для прибрежных районов, минимальная и максимальная частоты волн задавались равными 0.04 и 1.00 Гц соответственно. С учетом того, что волнение в Невской губе вызывается преимущественно локальным ветровым воздействием, разрешение модели по направлению было задано равным 10° .

С целью установить чувствительность модели к заданию различных физических процессов была проведена серия тестовых расчетов. Особое внимание уделялось чувствительности SWAN к учету в модели волновых триад, которые в мелководных районах перераспределяют энергию по частотам, что может приводить к появлению дополнительных локальных максимумов в спектре плотности волновой энергии. В литературе встречаются противоречивые точки зрения о целесообразности учета триад, реализованных в SWAN. Так, в [25] отмечается, что включение в расчеты волновых триад практически не повлияло на высоту значительных волн и пиковую частоту. В работе [28], где модельные расчеты по SWAN сравнивались с лабораторными наблюдениями в резервуаре, было установлено, что учет триад приводит к недооценке высоты значительных волн, тем самым ухудшая результаты расчетов. В [31] показано, что включение триад приводит к появлению второго пика на графике спектра волновой энергии, что совпадает с данными натурных наблюдений. Однако там же отмечалось, что в прибрежной зоне модель несколько переоценивает волновую энергию, особенно на высоких частотах.

Проведенные в настоящей работе тестовые расчеты для Невской губы с учетом и без учета триад показали, что различия в рассчитанных характеристиках волн, как правило, невелики. Лишь изредка в нескольких мелководных районах Невской губы с глубиной 0.2–0.4 м в случае учета триад отмечался резкий рост высоты волн, который, по-видимому, вызывался локальной неустойчивостью численного решения. В случае отсутствия учета триад этого не происходило. Поэтому в последующих расчетах эффект волновых триад не учитывался. В расчетах не были учтены также дифракция волн и подъем уровня из-за нелинейных волновых взаимодействий, так как описание этих эф-

фффектов в SWAN не охватывает все возможные ситуации, и зачастую программа работает с ошибками.

В качестве выходных данных модели SWAN для дальнейшего применения в модели взмучивания используются поля высот значительных волн H_s , периода T_m волн, максимальной придонной волновой орбитальной скорости U_w и направления распространения волн dir_w за каждый час.

Расчет придонного сдвигового напряжения. В настоящей работе максимальный за волновой цикл модуль суммарного придонного сдвигового напряжения τ_b , обусловленного течениями и волнением, в каждой точке рассчитывался согласно [2, 8]:

$$\tau_b = \sqrt{(\tau_m + \tau_w |\cos \theta|)^2 + (\tau_w |\sin \theta|)^2}, \quad (8)$$

где τ_m – средний за волновой цикл модуль придонного напряжения, Н/м²; τ_w – придонное сдвиговое напряжение за счет волнения, Н/м²; θ – угол между направлением течения и волнения, рад. Величина τ_m в формуле (8) рассчитывалась по так называемой эмпирической формуле DATA2, полученной по более чем сотне натуральных и лабораторных измерений среднего придонного напряжения [32]:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right], \quad (9)$$

где τ_c – придонное сдвиговое напряжение, создаваемое течением, Н/м². Оно определялось в процессе расчета характеристик придонного пограничного слоя в модели [29].

Придонное сдвиговое напряжение за счет волнения τ_w рассчитывалось по формуле

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2. \quad (10)$$

Коэффициент волнового трения f_w выбирался как максимальный из коэффициентов трения для случаев гладкого дна f_{ws} и шероховатого дна f_{wr} :

$$f_w = \max\{f_{wr}, f_{ws}\}, \quad f_{wr} = 0.237r^{-0.52}, \quad f_{ws} = B \text{Re}_w^{-N}, \quad (11)$$

где $r = A/k_s$ – относительная шероховатость; $\text{Re}_w = U_w A / \nu$ – число Рейнольдса; $A = U_w T_m / (2\pi)$ – полуорбитальное смещение, м; ν – кинематическая вязкость воды, м²/с; $k_s = 2.5d_{50}$ – размер шероховатости Никурадзе, м; $B = 2$ и $N = 0.5$ при $\text{Re}_w \leq 5 \cdot 10^5$, $B = 0.0521$ и $N = 0.187$ при $\text{Re}_w > 5 \cdot 10^5$.

Приведенная выше методика расчета суммарного придонного сдвигового напряжения обладает тем достоинством, что по формулам (8)–(11) оно рассчитывается явно, без каких-либо итерационных процедур, используемых в других методах расчета (см., напр., [1]). Это заметно сокращает время интегрирования модели. Аналогичным образом рассчитывалось суммарное придонное напряжение в [8], где успешно был воспроизведен процесс взмучивания в Ваттовом море вдоль юго-восточного побережья Северного моря, а также в [33], при моделировании переноса взвешенного вещества у побережья Калифорнии.

Выбор периода и условия расчетов. Невская губа долгое время испытывает на себе сильное антропогенное воздействие, связанное с проводимыми гидротехническими работами в этой акватории. Поэтому оценить интенсивность естественного взмучивания

донных осадков в ней крайне трудно вследствие поступления взвеси от искусственных источников, интенсивность которых во много раз превышает естественное взмучивание. В этой связи важно выбрать период времени, в течение которого техногенное влияние на концентрацию взвеси в Невской губе минимально.

Гидротехнические работы в акватории Невской губы, связанные с выемкой грунта и намывом новых территорий, начались еще в 1976 г. и с различной интенсивностью продолжались вплоть до начала 1990-х. Этот период характеризуется повышенными концентрациями взвеси в Невской губе [34]. Период с начала 1990-х по 2004 г. характеризовался постепенным улучшением состояния вод акватории. К 1998 г. концентрация взвеси уменьшилась в 3–4 раза, а к 2000 г. состояние вод Невской губы вернулось к своему естественному состоянию [35]. В 2005 г. в Невской губе также проводились гидротехнические и дноуглубительные работы [36]. Активные работы по проекту «Морской фасад Санкт-Петербурга», начатые в 2006 г. и продолженные в последующие годы, фактически полностью исключили возможность для изучения процесса естественного взмучивания в Невской губе в этот период из-за крайне высоких концентраций взвеси.

Таким образом, наиболее подходящим для изучения естественного взмучивания в Невской губе являются 2000–2004 гг. Но даже в этот период в течение полутора лет (с ноября 2001 г. по май 2003 г.) проводились работы по реконструкции Константиновского дворца в пос. Стрельна, расположенном на побережье Невской губы, к юго-западу от Санкт-Петербурга. Учитывая сказанное, для исследования естественного взмучивания был выбран 2004 г., в течение которого по доступной авторам информации активные гидротехнические работы в Невской губе не проводились.

Модельные расчеты были выполнены для периодов с 19 мая по 1 августа (летний расчет) и с 28 августа по 14 октября (осенний расчет) 2004 г., для которых были доступны данные по уровню в Кронштадте и фактическая метеорологическая информация по станции «Санкт-Петербург» [37]. На восточной границе области использовались фактические данные о температуре воды и расходе Невы за 2004 г. [38]. При расчете характеристик ветрового волнения в качестве входных данных задавались однородное по акватории поле скорости ветра по данным [37] и рассчитанные по модели [29] поля уровня воды и скорости течений. На открытой западной границе входящее волнение полагалось равным нулю. В начальный момент времени волны в исследуемой области также отсутствовали.

Репрезентативное сравнение модельных расчетов с данными спутниковых наблюдений возможно только для периодов, когда взмучивание в Невской губе достаточно интенсивно, чтобы обеспечить значительные концентрации взвеси в поверхностном слое воды. Такая ситуация возникает при ветровом волнении, вызванном сильными ветрами. Дело осложняется тем, что периоды сильных ветров, которых в течение весны, лета и осени 2004 г. было немного, часто совпадают с периодами значительной облачности над Невской губой, препятствующей спутниковым измерениям поверхностной концентрации взвеси. В результате для рассматриваемого периода 2004 г. был найден всего лишь один спутниковый снимок, удовлетворяющий указанным выше условиям. В следующей части статьи приводится детальное сравнение спутниковых оценок поверхностной концентрации взвеси, полученных в результате обработки этого снимка, с результатами модельных расчетов.

В выполненных расчетах используется уточненная схема распределения донных осадков (рис.2), построенная в соответствии с литологической картой Невской губы [35].

Результаты расчетов и их сравнение со спутниковыми данными

Распределение высоты значительных волн. На рис.3, 4 (см.цв.вклейку) представлено пространственное распределение модельной высоты значительных ветровых волн для различных метеорологических ситуаций в летний и осенний периоды. Как видно, поля рассчитанных высот значительных волн соответствуют скорости и направлению ветра: отчетливо выделяются зоны волновой тени вдоль наветренного берега; максимальные высоты волн отмечаются у подветренного берега, причем в тех районах, где длина разгона волн максимальна. При западном ветре волны проходят через судопропускное сооружение С1 КЗС и распространяются дальше на восток по Невской губе. Согласно данным архива погоды [37], максимальная скорость ветра составляла 5 и 8 м/с соответственно в летний и осенний периоды. Большую часть времени в эти периоды рассчитанные высоты значительных волн лежали в диапазоне от 10 до 20–30 см. При усилении ветра высота значительных волн иногда превышала 50 см.

Как уже говорилось, на открытой западной границе входящее волнение полагалось нулевым из-за отсутствия данных. Поэтому при западных направлениях ветра к западу от КЗС модель недооценивает высоту волн. Это отчетливо видно на рис.3, когда 22 мая и 15 июня при западном ветре высота волн равна нулю вдоль западной границы области, и дальнейшее развитие волнения в восточном направлении начинается именно отсюда. Однако на результаты расчетов волнения в самой Невской губе это обстоятельство практически не влияет из-за наличия КЗС и о.Котлин, препятствующих свободному прохождению ветровых волн из Финского залива в Невскую губу.

Одним из достоинств модели SWAN является автоматический учет в ней длины разгона волн, который не учитывался в выполненных ранее численных экспериментах, где использовалась простая параметрическая модель ветрового волнения (см. [24]). Это приводило к переоценке высоты волны, поскольку в модели [24] использовались эмпирические зависимости для уже развитого волнения. Кроме того, так как направление волнения не учитывалось, то участков волновой тени и роста высоты волн у подветренного берега акватории не наблюдалось. В результате вне зависимости от направления ветра взмучивание отмечалось вдоль всего побережья Невской губы, что маловероятно. Напротив, судя по рис.3, 4, высоты волн и соответственно придонные волновые орбитальные скорости малы вдоль наветренной стороны акватории.

Таким образом, представленные результаты расчетов высоты значительных волн по модели SWAN свидетельствуют о том, что модель качественно правильно воспроизводит основные закономерности генерации и распространения волн.

Поверхностное распределение концентрации взвеси. Одним из важнейших параметров, регулирующих интенсивность взмучивания, является критическое значение придонного сдвигового напряжения. Диапазон изменения критического напряжения был оценен по формулам (1)–(4), при использовании следующих значений параметров p_{cs} и γ , характеризующих долю глинистого материала в осадках и интенсивность когезии для

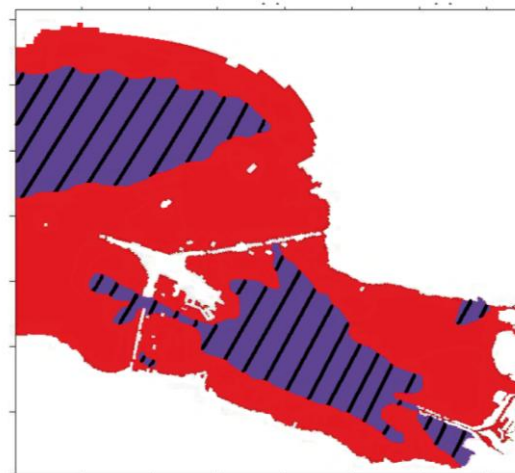


Рис.2. Схема расположения типов донных осадков в исследуемой области. Заштрихованы илы, серое – пески.

иловых донных осадков: $p_{cs,max} = 0.1$, $\gamma_{max} = 2$ и $p_{cs,min} = 0$, $\gamma_{min} = 1$. В этих оценках были заданы следующие значения среднего диаметра и плотности частиц в донных осадках: $d_{50} = 110$ мкм, $\rho_s = 2370$ кг/м³ для частиц песка; $d_{50} = 9$ мкм и $\rho_s = 2000$ кг/м³ для частиц ила [24]. В результате оказалось, что при $p_{cs} = 0.1$ и $\gamma = 2$ критические напряжения для песков и илов составляют 0.138 и 0.157 Н/м², тогда как при $p_{cs} = 0$ и $\gamma = 1$ они равны 0.104 и 0.023 Н/м² соответственно. Значения критического напряжения, полученные с учетом и без учета эффекта когезии и содержания глинистой фракции, отличаются для песков и илов соответственно в 1.3 и 6.8 раза, что свидетельствует о сильном влиянии когезии и наличия мелкодисперсных донных осадков на возможность взмучивания, особенно для мелких иловых частиц.

Для примера на рис.5 (см.цв.вклейку) приведены два поля поверхностной концентрации минеральной взвеси при $p_{cs} = 0$ для одного и того же момента времени (22 мая 2004 г.), при расчете которых значения всех модельных параметров, за исключением коэффициента γ , были одинаковыми. Как видно, при $\gamma = 1$ иловые донные осадки подвержены взмучиванию в большей степени, чем при $\gamma = 2$. В этом случае отмечается даже значительный вынос взвешенного вещества за пределы Невской губы. При $\gamma = 2$ взмучивание наблюдается лишь во вдольбереговой полосе, при этом основную массу взвеси составляют песчаные частицы. В обоих случаях интенсивность взмучивания песчаных частиц одинаковая, так как значение коэффициента γ не влияет на нее.

Следует отметить, что помимо влияния на критическое напряжение наличие глинистой фракции в донных осадках (параметр p_{cs}) учитывается в модели и при расчете нижнего граничного условия для концентрации частиц песка и ила. В результате зависимость концентрации взвеси от величины p_{cs} принимает довольно сложный характер. Таким образом, модель взмучивания сильно чувствительна к изменениям параметров p_{cs} и γ , и, следовательно, они должны быть выбраны путем сравнения с данными натурных наблюдений. Этот выбор осуществлялся на основе визуального сравнения результатов расчета с данными спутниковых измерений [39].

На рис.6, а показано пространственное распределение суммарной концентрации взвешенного вещества TSM (the total suspended matter) в Невской губе на 15 июня 2004 г., полученное в результате обработки данных уровня L2 спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Aqua. Обработка исходных данных спутниковых измерений выполнялась согласно алгоритму, изложенному в [40].

Несмотря на низкое качество изображения, представленного на рис.6, а (пространственное разрешение спутниковых данных составляет примерно 1×1 км), его использование позволило подобрать коэффициент γ , обеспечивающий наилучшее согласие рассчитанного распределения поверхностной концентрации минеральной взвеси с указанным спутниковым распределением TSM. Эти коэффициенты оказались равными $\gamma = 1.4-1.5$. При $\gamma = 1.5$ критическое сдвиговое придонное напряжение для частиц ила, вычисленное по формулам (1)–(4), составляет 0.06 Н/м². Отметим, что в работе [13] в результате калибровки эмпирических зависимостей (1)–(4) по данным экспериментальных исследований также было получено значение коэффициента γ , равное 1.5.

Проведенные в процессе калибровки модели многочисленные расчеты с заданием различных значений параметра p_{cs} для песков и илов позволили установить, что для Невской губы наилучшее соответствие между натурными и модельными данными наблюдается при задании нулевого содержания глинистой фракции в песочных донных

осадках, в то время как для иловых донных отложений задавалось 10%-ное содержание глины. Это согласуется с литологической картой Невской губы [35], где в районах с иловыми донными осадками часто присутствуют и осадки с глинистой фракцией. Соответствующие указанному содержанию глинистой фракции в осадках значения критического сдвигового придонного напряжения для частиц песка и ила составляют 0.104 и 0.06 Н/м^2 соответственно.

Согласно наилучшему рассчитанному распределению поверхностной концентрации взвешенных частиц на 15 июня 2004 г. (рис.6, б), основные районы наибольших концентраций взвеси – это северное побережье Невской губы, побережье о.Котлин, небольшие районы в устье Невы, мелководный район к югу от о.Котлин, а также вдольбереговая полоса вне пределов Невской губы к северу от КЗС, в районе Сестрорецка. Приведенное распределение свидетельствует также о выносе взвешенного вещества за пределы Невской губы через судопропускное сооружение С1 КЗС с образованием пятна повышенной концентрации между о. Котлин и южным берегом Финского залива. В определенной степени это пятно соответствует пятну повышенной концентрации (рис.6, а), расположенному к юго-западу от о.Котлин: положение пятен почти совпадает, и концентрации взвеси в них близки.

Хотя распределения концентрации взвеси, приведенные на рис.6, а и б, в целом схожи, имеются и существенные различия между ними. Прежде всего это поперечный размер прибрежной зоны высоких концентраций вдоль северного берега Невской губы. На спутниковом снимке по сравнению с рассчитанным распределением эта зона простирается заметно дальше в южном направлении. Модельные результаты не отразили также наблюдаемый шлейф вод с повышенной концентрацией взвеси к северу от водопропускного сооружения В3. Наконец, спутниковый снимок характеризуется некоторой фоновой концентрацией взвеси (около 2–3 мг/л) повсюду в Невской губе, чего нет в модельных расчетах. В определенной мере перечисленные различия могут быть связаны с тем, что в модели используются лишь две основные фракции донных осадков. Поэтому в тех районах, где в модели на дне заданы пески, при взмучивании в воду не поступают более мелкие частицы других фракций, тогда как в реальных условиях такой процесс имеет место. С другой стороны, нельзя полностью полагаться и на восстановленные по спутниковым данным распределения TSM, точность которых все еще довольно низка. Наконец, различия в модельных результатах и спутниковых изображениях могут быть вызваны и тем, что спутниковые данные по TSM содержат в себе суммарную концентрацию, обусловленную как естественным взмучиванием, так и поступлением в воду минеральных и органических частиц вследствие гидротехнических работ, сбросов отходов, речного стока, биологической продуктивности, которые в модели не учитываются.

Трехмерная модель циркуляции Невской губы, описывающая взмучивание и перенос донных осадков [24], модифицирована в следующем: 1) введена зависимость скорости гравитационного опускания взвешенных частиц от концентрации взвеси; 2) уточнен метод расчета суммарного придонного сдвигового напряжения; 3) при расчете критического придонного напряжения учитываются эффекты когезии взвешенных частиц; 4) при расчете характеристик ветрового волнения используется модель SWAN.

Результаты расчетов характеристик ветрового волнения в Невской губе по модели SWAN позволяют сделать вывод: модель правильно воспроизводит основные закономерности генерации и распространения ветровых волн.

Наилучшее соответствие между спутниковыми данными и результатами расчетов концентрации взвешенных частиц по модифицированной модели в Невской губе при задании: 1) эмпирического коэффициента γ в формуле (2), контролирующего поправку на когезию донных иловых осадков, равным 1.5; 2) нулевого содержания глинистой фракции в песочных и 10%-ного содержания глины в иловых осадках.

Авторы выражают свою признательность Д.А.Петренко за помощь в подготовке спутниковых снимков.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. 1979. V.84. P.1797–1808.
2. Soulsby R.L. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. London: Tomas Telford Services, 1997. 253 p.
3. Soulsby R.L., Clarke S. Bed shear stresses under combined waves and currents on smooth and rough beds. Report TR 137, HR Wallingford, 2005. 52 p.
4. van Rijn L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport // J. Hydraul. Eng. 2007. V.133, N 6. P.668–689.
5. Lesht B.M. Climatology of sediment transport on Indiana Shoals, Lake Michigan // J. Great Lakes Res. 1989. V.15. P.486–497.
6. 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. V.105, N C3. P.6591–6610.
7. Schwab D.J., Eadie B.J., Assel R.A., Roebber P.J. Climatology of large sediment resuspension events in southern Lake Michigan // J. Great Lakes Res. 2006. V.32. P.50–62.
8. Pleskachevsky A., Gunther H. Modeling of suspended particulate matter transport in coastal areas // Proc. US/EU-Baltic International Symposium, IEEE/OES, 2008. P.1–8.
9. Shields A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Berlin, 1936. Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. 26 p.
10. Miller M.C., Mc Cave I.N., Komar P.D. Threshold of sediment motion under unidirectional current // Sedimentology. 1977. V.24. P.507–527.
11. NOGAT Offshore Pipeline; report on erodibility tests. Rep. N H1050. The Netherlands, Delft: Delft Hydraulics, 1989.
12. Roberts J., Jepsen R., Gotthard D., Lick W. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles // J. Hydraul. Eng. 1998. V.124 (12). P.1261–1267.
13. 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. V.133, N 6. P. 649–667.
14. Li J. The rule of sediment transport on the Nanhui tidal flat in the Changjiang Estuary // Acta Oceanol. Sinica. 1991. V.10, N 1. P.117–127.
15. Li J., Qing H. Q., Zhang L., Shen H. Sediment deposition and resuspension in mouth bar area of the Yangtze Estuary // China Ocean Eng. 2000. V.14, N 3. P.339–348.
16. Shi Z., Zhou H.J. Controls on effective settling velocities of mud flocs in the Changjiang Estuary, China // Hydrol. Process. 2004. V.18. P.2877–2892.
17. Vinzon S.B., Mehta A.J. Lutoclines in high concentration estuaries: Some observations at the mouth of the Amazon // J. Coastal Res. 2003. V.19, N 2. P.243–253.
18. Thorn M.F.C. Physical processes of siltation in tidal channels // Proc. Hydraulic Modeling of Maritime Engineering Problems, Institution of Civil Engineers. London, 1981. P.47–55.
19. Richardson J.F., Zaki W.N. Sedimentation and fluidization: Part I // Trans. Inst. Chem. Eng. 1954. V.32. P.35–50.
20. Richardson J.F., Meikle R.A. Sedimentation and fluidization: Part II // Trans. Inst. Chem. Eng. 1961. V.39. P.348–356.
21. Winterwerp J.C. On the dynamics of high-concentrated mud suspensions. Doctoral thesis. The Netherlands, Delft: Delft University of Technology, 1999. 190 p.

22. Шишкин Б.А. Современное состояние экосистемы Невской губы и восточной части Финского залива // Тр. ГГИ, 1988. Вып.1. С.89–97.
23. Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. В.А.Румянцева и В.Г.Драбковой. СПб.: Институт озераедения РАН, Северо-Балтийский морской фонд, 1999. 341 с.
24. Мартыянов С.Д., Рябченко В.А., Рыбалко А.Е. Моделирование процесса взмучивания донных осадков в Невской губе // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 20. С.13–26.
25. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: Part 1. Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. V.104, N C4. P.7649–7666.
26. Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions, Part 2. Verification // J. Geophys. Res. 1999. V.104, N C4. P.7667–7681.
27. Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C. Influence of wind resolution on the prediction of waves generated in an estuary // J. of Coastal Research. 2009. Special Issue V.56. P.1419–1423.
28. Wood D.J., Muttray M., Oumeraci H. The SWAN model used to study wave evolution in a flume // Ocean Engineering. 2001. V.28. P.805–823.
29. Ryabchenko V., Dvornikov A., Haapala J., Myrberg K. Modelling ice conditions in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea // Continental Shelf Research. 2010. V.30. P.1458–1471.
30. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. American Geophysical Union / Ed.: N.Heaps. Washington, D.C., 1987. P.208.
31. Rogers W.E., Kaihatu J.M., Booij N., Holthuijsen L. Improving the numerics of a third-generation wave action model. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, 1999. 84 p.
32. Soulsby R.L. Bed shear-stresses due to combined waves and currents // Advances in coastal morphodynamics / Eds.: M.J.F.Stive, H.J.De Vriend, J.Fredsoe, L.Hamm, R.L.Soulsby, C.Teisson, Winterwerp J.C. Delft, NL: Delft Hydraulics, 1995. P.4-20–4-23. ISBN 90-9009026-6.
33. 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. V.27. P.832–853.
34. Усанов Б.П., Викторов С.В., Сухачева Л.Л. Новый удар по Невской губе // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 3–4 (16–17). С.70–74.
35. Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Сухачева Л.Л., Жамойда В.А., Григорьев А.Г. Воздействие гидротехнических работ на седиментационные процессы в восточной части Финского залива // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. ISBN 978-5-7692-1075-4. С.1–9.
36. Усанов Б.П., Викторов С.В., Сухачева Л.Л. Новый удар по Невской губе // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 5(18). С.60–63.
37. [Электронный ресурс] Сервер «Погода России». <http://meteo.infospace.ru/>.
38. Гидрологические наблюдения на речных станциях и постах Северо-Западного УГМС. Период наблюдений: 2004 г. Северо-Западное межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2005.
39. [Электронный ресурс] Ocean color. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
40. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Folkestad A., Pettersson L.H., Sorensen K., Shuchman R. Semi-empirical Algorithm for the Retrieval of Ecology-Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments // Algorithms. 2009. V.2, N 1. P.470–497.

Статья поступила в редакцию 04.03.2013 г.

