

На правах рукописи

УДК 551.463.8

Мартьянов Станислав Дмитриевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВЗМУЧИВАНИЯ  
ДОННЫХ ОСАДКОВ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ МОРЕЙ  
НА ПРИМЕРЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Санкт-Петербургский Филиал».

**Научный руководитель:**

**Рябченко Владимир Алексеевич**, доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией моделирования океанских биогеохимических циклов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский Филиал.

**Официальные оппоненты:**

**Гриценко Владимир Алексеевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, профессор кафедры географии океана, г. Калининград.

**Кулаков Михаил Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Отдел океанологии, старший научный сотрудник, г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:** ФГБУН «Институт Озероведения РАН», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится « **12** » **марта 2015 г. в 15 час. 30 мин.** на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета и на сайте: <http://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат географических наук,  
профессор



Воробьев В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к прогнозу состояния прибрежных районов морей вследствие необходимости в комплексном управлении прибрежной зоной. Взмучивание донных осадков в современных математических моделях все еще описывается различными способами, что говорит о продолжающихся поисках наилучшего способа учета характеристик донных осадков и внешнего воздействия на данный процесс. Дополнение имеющихся гидродинамических и экосистемных моделей моделью взмучивания донных осадков позволяет учитывать такие эффекты как изменение плотностной стратификации вследствие наличия в воде взвеси с плотностью, отличной от плотности воды, ослабление проникающего в воду света, влияющего на первичную продукцию, изменение конфигурации береговой черты и профиля дна и другие.

Большинство существующих сегодня моделей взмучивания при параметризации процесса используют такие величины как суммарное придонное напряжение, критическое придонное напряжение, различное для разных типов донных осадков, а также физические характеристики самих частиц. Практически все подобные модели в большей или меньшей степени опираются на результаты лабораторных и натурных наблюдений, в ходе которых были получены те или иные эмпирические зависимости, дополняющие строгое математическое описание процесса. Проблема заключается в том, что входящие в эти эмпирические соотношения коэффициенты нуждаются в уточнении, в связи с чем необходима калибровка моделей взмучивания по данным наблюдений.

В настоящее время в акватории Невской губы проводятся различного рода дноуглубительные и иные гидротехнические работы, что ведет за собой интенсивное поступление взвешенного вещества в воду. Вместе с тем, всегда существует и естественное поступление донного осадочного вещества в водную толщу посредством его взмучивания под действием ветровых волн и течений. Настоящая работа посвящена определению естественной составляющей поступления взвеси.

### Цели и задачи

**Цель** настоящей работы состоит в усовершенствовании гидротермодинамической модели циркуляции путем ее дополнения моделью взмучивания донных осадков с последующим применением полученного модельного комплекса для воспроизведения процесса взмучивания донных и переноса взвешенных осадков в прибрежном районе моря на примере Невской губы. Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

- Расширение трехмерной гидротермодинамической модели Невской губы путем включения в нее дополнительных блоков для

расчета взмучивания и последующего переноса двух типов донных осадков: песков и илов,

- Выбор оптимального представления донных осадков в модели,
- Калибровка модели взмучивания посредством сравнения результатов расчетов со спутниковыми данными,
- Расчет взмучивания донных осадков в Невской губе и восточной части Финского залива для лет с резко различающимся внешним воздействием,
- Определение основных районов взмучивания донных осадков в исследуемой области.

### **Научная новизна**

Впервые выполнены расчеты концентрации взмученного донного вещества для разных типов донных осадков в Невской губе при использовании модели, учитывающей совместное нелинейное взаимодействие придонных напряжений, генерируемых ветровыми волнами и течением, учитывающей сцепление частиц донных осадков (когезию), переменную скорость оседания взвеси, а также влияние плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию. Обоснована необходимость учета в модели данных факторов для корректного воспроизведения поля взвешенных частиц в Невской губе. Впервые получены оценки пространственного распределения и периодов интенсивного взмучивания в Невской губе в годовом цикле.

### **Практическая значимость**

Разработанный модельный комплекс может использоваться с целью определения интенсивности взмучивания в исследуемых районах морей. При включении в модель параметризации динамики донных наносов она может быть использована для расчета изменения профиля дна и конфигурации береговой черты. Получаемые результаты могут быть использованы в экосистемных моделях для учета ослабления проникающего в воду света взвешенными частицами при расчете первичной продукции фитопланктона.

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач в работе использовалась трехмерная гидротермодинамическая модель Невской губы [Ryabchenko et al., 2010], основанная на Принстонской Океанической Модели [Blumberg, Mellor, 1987]. Для получения характеристик ветрового волнения использовалась модель SWAN [Booij et al., 1999]. При параметризации процесса взмучивания использовались подходы, изложенные в работах [Каган, Неелов, 1994; van Rijn, 2007; Soulsby, 1997] и др.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Гидродинамическая модель взмучивания донных и переноса взвешенных осадков в прибрежных районах морей, учитывающая

- основные физические механизмы транспорта и взаимодействия взвешенных частиц,
- Обоснование необходимости комплексного учета в моделях взмучивания в Невской губе различий в пространственном распределении и свойствах донных осадков, когезии, а также влияния плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию,
  - Закономерности пространственного распределения и периодов максимального взмучивания на акватории Невской губы.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается использованием в ней многократно проверенных и хорошо зарекомендовавших себя численных математических моделей, применяемых в океанологии, использованием эмпирических зависимостей, полученных по большому количеству лабораторных и натуральных наблюдений, сравнением результатов с данными спутниковых измерений, а также непротиворечивостью полученных результатов с результатами других исследователей.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на международном семинаре «Flood vulnerability and flood protection in tidal and non-tidal regimes: North and Baltic seas» (Дельфт, Нидерланды, 2009), на заседаниях Ученого совета океанологического факультета Российского государственного гидрометеорологического университета в 2009 и 2010 годах, на международной конференции Baltic Sea Science Congress (Клайпеда, Литва, 2013), на заседаниях Секции Ученого совета Санкт-Петербургского филиала Института Океанологии им. П.П.Ширшова РАН (Санкт-Петербург, 2013, 2014), на третьей объединенной конференции молодых ученых и специалистов МАГ-2013 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2013), на международной конференции «6th IEEE/OES Baltic Symposium 2014» (Таллин, Эстония, 2014).

### **Личный вклад диссертанта**

Автором непосредственно выполнена работа по расширению модели циркуляции Невской губы для расчета поступления со дна и переноса взвешенного донного вещества. Для Невской губы развернута модель SWAN для расчета характеристик ветрового волнения. Выполнена настройка и калибровка модели взмучивания, оценена ее чувствительность к выбору значений основных параметров модели. Все проведенные расчеты и их анализ выполнены автором самостоятельно.

### Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 2 статьи в журналах из списка ВАК.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 106 страниц, включая 33 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 122 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** описывается современное состояние исследований процесса взмучивания донных осадков и приводится краткий аналитический обзор основных подходов к его математическому моделированию.

**В разделе 1.1** описываются основные механизмы, приводящие к взмучиванию донных осадков в различных районах Мирового океана. Приводится аналитический обзор некоторых моделей и подходов к параметризации поступления взвеси со дна.

**В разделе 1.2** рассматривается процесс гравитационного оседания взвешенных частиц. Отмечается, что, в отличие от оседания отдельной частицы в вязкой жидкости, при оседании множества частиц, составляющих взвесь, они взаимодействуют друг с другом, в результате чего скорость их оседания уменьшается (затрудненное оседание). Кроме затрудненного оседания, отмечается необходимость учета флокуляции, или слипания мелких взвешенных частиц, влекущая за собой рост эффективного диаметра частиц.

**В разделе 1.3** обсуждается влияние наличия в воде взвешенных частиц на другие гидрологические характеристики. Частицы взвешенного вещества, обладая собственной плотностью, отличной от плотности окружающей воды, изменяют общую плотностную стратификацию столба жидкости. Это приводит, во-первых, к изменениям в поле течений, а во-вторых, к изменению интенсивности турбулентного перемешивания и, следовательно, всех остальных термогидродинамических характеристик.

**Во второй главе** приводится описание модельного комплекса, использованного в работе для воспроизведения взмучивания и переноса взвешенных частиц донных осадков.

**В разделе 2.1** дается краткое описание используемой трехмерной модели общей циркуляции океана Принстонского университета [Blumberg, Mellor, 1987], основанной на уравнениях гидротермодинамики несжимаемой жидкости. Модель имеет в вертикальном направлении

$\sigma$ -координату, представляющую собой множество топологически идентичных слоев постоянной или переменной толщины. Для получения коэффициентов вертикального турбулентного обмена используется модель турбулентного замыкания Меллора-Ямады уровня 2.5. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена вычисляется по формуле, предложенной Смагоринским. Плотность морской воды рассчитывается по уравнению состояния УС-80.

**В разделе 2.2** подробно описывается модель взмучивания донных осадков. В ее основе лежит адвективно-диффузионное уравнение для концентрации взвеси, записанное в  $\sigma$ -координате и решаемое отдельно для каждой фракции взвешенных частиц:

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

где  $C$  – объемная концентрация взвешенных частиц,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $D$  – глубина водоема, м,  $t$  – время, с,  $x, y$  – горизонтальные координаты, м,  $U, V, W$  – компоненты вектора скорости течения, м/с,  $W_s$  – скорость гравитационного оседания частиц, м/с,  $K_H$  и  $A_H$  – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии, соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

На свободной поверхности водоема принимается условие равенства нулю потока взвешенного вещества:

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

На нижней границе в модели ставится условие [Каган, Неелов, 1994]:

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

где  $C_a$  – объемная концентрация взвешенных частиц на нижнем отсчетном уровне,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Величина  $C_a$  вычисляется согласно методике, предложенной в работе [van Rijn, 2007]:

$$C_a = 0.015(1 - p_{clay})f_{silt} \left( \frac{d_{50}}{a} \right) \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}, \quad (4)$$

где  $p_{clay}$  – доля глинистой (пелитовой) фракции ( $< 8$  мкм) в донных осадках,  $f_{silt}$  – иловый показатель,  $d_{50}$  – средний диаметр частиц, м,  $a$  – отсчетный уровень над дном, м,  $T = (\tau_b - \tau_{cr})/\tau_{cr}$  и  $D_* = d_{50}((\rho_s/\rho - 1)g\nu^{-2})^{1/3}$  – безразмерные параметры придонного сдвигового напряжения и размера частиц соответственно,  $\tau_b$  – придонное сдвиговое напряжение, обусловленное совместным действием волн и течений,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $\tau_{cr}$  – критическое значение сдвигового напряжения, при котором начинается процесс взмучивания,  $\text{Н}/\text{м}^2$ .

Базовая скорость гравитационного оседания отдельной частицы рассчитывается по трем различным формулам в зависимости от размера частицы: менее 100 мкм, от 100 до 1000 мкм и больше 1000 мкм. В модели дополнительно вводятся поправочные коэффициенты на затрудненное оседание и возможность протекания процесса флокуляции. При вычислении критического придонного напряжения в модели учитываются эффекты когезии и уплотненности донных осадков. В модели также реализован учет влияния плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию посредством вычисления плотности не только как функции температуры, солености и давления, но и концентрации взвеси.

**В разделе 2.3** описывается методика расчета суммарного придонного напряжения. Максимальный за волновой цикл модуль суммарного придонного сдвигового напряжения  $\tau_b$ , обусловленного течениями и волнением, рассчитывается как [Soulsby, 1997]:

$$\tau_b = \sqrt{(\tau_m + \tau_w |\cos \lambda|)^2 + (\tau_w |\sin \lambda|)^2} \quad (5)$$

где  $\tau_m$  – средний за волновой цикл модуль придонного напряжения, Н/м<sup>2</sup>,  $\tau_w$  – придонное сдвиговое напряжение за счет волнения, Н/м<sup>2</sup>,  $\lambda$  – угол между направлением течения и волнения, рад. Величина  $\tau_m$  в рассчитывается по эмпирической формуле DATA2 [Soulsby, 1995]:

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (6)$$

где  $\tau_c$  – придонное напряжение, создаваемое течением, Н/м<sup>2</sup>.

**В разделе 2.4** дается краткое описание модели ветрового волнения SWAN и условия расчетов по ней. В качестве выходных данных модели SWAN используются поля высот значительных волн, периода волн, максимальной придонной волновой орбитальной скорости и направления распространения волн за каждый час.

**В третьей главе** приводятся результаты моделирования взмучивания донных осадков в Невской губе.

**В разделе 3.1** дается краткое физико-географическое описание Невской губы – мелководной и практически пресноводной акватории с соленостью, как правило, менее 1 ‰, обусловленной пресноводным стоком реки Невы (Рис. 1).



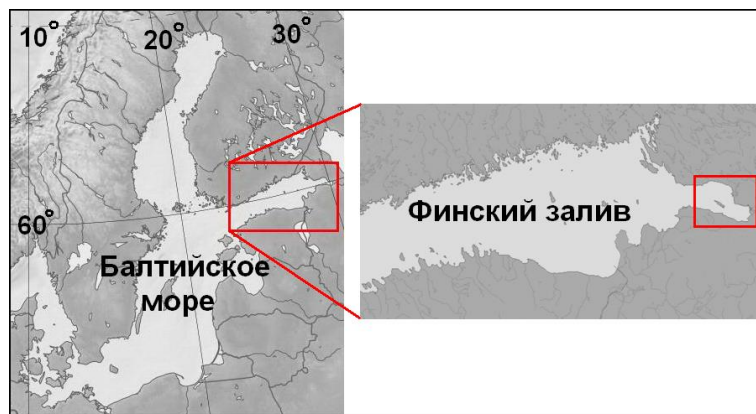


Рисунок 1 – Положение исследуемой акватории в восточной части Финского залива

В разделе 3.2 описываются условия модельных расчетов, и выполняется выбор 2004 года как наиболее пригодного для расчетов временного периода с точки зрения минимизации влияния сторонних источников взвеси на концентрацию взвешенных частиц в Невской губе. Приводится описание трехмерной модели Невской губы, имеющей в вертикальном направлении 7 равномерных  $\sigma$ -уровней. В горизонтальной плоскости расчетная сетка состоит из 350x182 узлов с минимальным разрешением 60-70 м и максимальным разрешением около 1 км (Рис. 2).

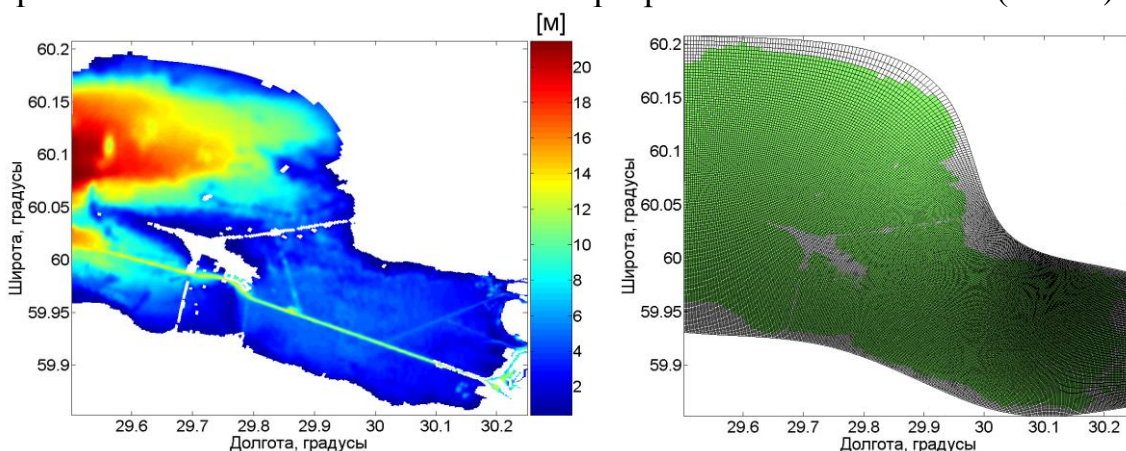


Рисунок 2 – Слева: Карта глубин в Невской губе и в восточной части Финского залива. Справа: Расчетная область и линии горизонтальной квазиортогональной сетки модели

В расчетах на восточной границе задавалась скорость течения, рассчитываемая по данным о расходе Невы, соответствующим образом распределенном по рукавам, температура и нулевая соленость речной воды. На открытой западной границе задавались фактические колебания уровня в Кронштадте, и ставилось условие излучения для скорости течения. Для температуры и солености на западной границе использовалось либо условие излучения, либо климатические значения в зависимости от направления потока. На твердых боковых границах

ставилось условие прилипания для скорости течения и условие отсутствия потока тепла и соли. Для концентрации взвеси на твердых боковых границах ставилось условие отсутствия потока, на жидких боковых границах ставилось условие излучения. Во всех расчетах на начальный момент времени полагалась нулевая концентрация взвеси во всей области. В расчетах использовалась фактическая метеорологическая информация по станции Кронштадт.

При расчете характеристик ветрового волнения по модели SWAN в качестве входных данных задавалось однородное по акватории, но меняющееся во времени, поле ветра и предварительно рассчитанные по циркуляционной модели поля уровня и скорости течения. На открытой западной границе входящее ветровое волнение полагалось равным нулю, а для выходящего волнения задавалось условие излучения. Расчетная область и сетка – те же, что использовались в модели циркуляции (Рис. 2).

Расчеты для 2004 года проводились для периода с 19 мая по 16 июня, для которого были доступны все упомянутые выше данные, а также результаты спутниковых наблюдений.

**В разделе 3.3** представлены оценки интенсивности ветрового волнения в Невской губе, полученные в результате расчетов для 2004 года. Большую часть времени в расчетный период модельные высоты волн лежали в диапазоне от 10 до 25 см при скоростях ветра 1–4 м/с. При усилении юго-юго-западного ветра до 11 м/с вычисленная высота значительных волн в Невской губе составляла 50-70 см с максимумом вдоль северного берега. Показано, что максимальные высоты волн в акватории вызывались сильными ветрами западных и юго-западных направлений.

**В разделе 3.4** приводятся результаты модельных расчетов придонных напряжений. Показано, что максимумы в придонных напряжениях, вызываемых течением или волнением, хоть и имеют один порядок величины, но пространственное распределение этих двух компонент суммарного придонного напряжения сильно отличается. Придонные напряжения от течения, как правило, локализованы в небольших по площади районах, в то время как ветровое волнение генерирует значительные придонные напряжения на гораздо большей площади, в том числе во вдольбереговой полосе, в мелководных и открытых районах Невской губы.

**В разделе 3.5** приводятся результаты расчетов концентрации взвешенных частиц при допущении о наличии на дне только песчаных или только илистых осадков. Диаметр частиц песка задавался равным 110 мкм, ила – 9 мкм. Рассчитанные базовые значения скорости оседания (без учета поправок) составили  $7.5 \times 10^{-3}$  м/с и  $4.2 \times 10^{-5}$  м/с для песка и ила, соответственно. Расчеты показали, что в том случае, когда все дно предполагается исключительно песчаным, интенсивное взмучивание

имеют место лишь в узкой прибрежной зоне и на отмелях и практически отсутствуют в центральной части Невской губы. Горизонтальный перенос взмученных частиц песка оказался незначительным. В случае же полностью илистого дна полученное решение характеризовалось значительно более высокими концентрациями взвеси. Помимо явного различия значений концентрации в количественном плане, речь идет о пространственном расширении зон с высокими концентрациями взвеси. Для илистой взвеси становится заметным ее горизонтальный перенос. Что касается вертикального распределения частиц, то здесь можно отметить более равномерную вертикальную структуры поля концентрации частиц ила по сравнению с концентрацией взвешенного песка (Рис. 3).

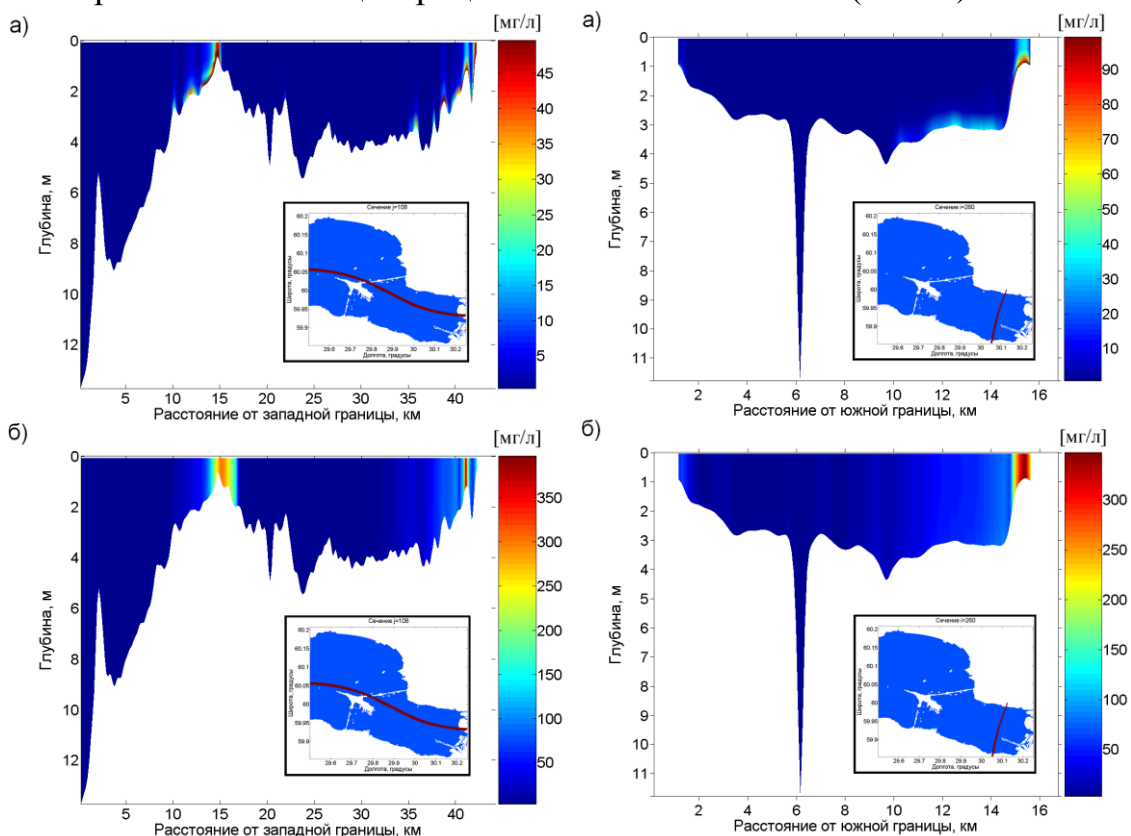


Рисунок 3 – Вертикальные сечения поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 22 мая 2004 года. На дне задавались только пески (а) и только илы (б). На вкладках показано положение вертикального сечения

В настоящей работе было сделано допущение, что донные осадки состоят из двух фракций частиц – песков и илов. Для каждой из этих фракций в модели отдельно решается уравнение (1). Выделение в модели двух фракций донных осадков основано на наблюдаемом пространственном распределении осадочного материала в Невской губе и необходимостью поддержания вычислительной эффективности модели. Использование литологической карты дна Невской губы позволило выделить области дна, характеризующиеся преобладанием в донных осадках песчаной или иловой составляющей (Рис. 4). В качестве

характерного диаметра для частиц в модели заданы значения 110 мкм для песка и 9 мкм для ила, соответствующие осредненным значениям реальных размеров этих частиц в Невской губе. Плотность самих частиц песка принималась равной  $2370 \text{ кг/м}^3$ , частиц ила –  $2000 \text{ кг/м}^3$ .

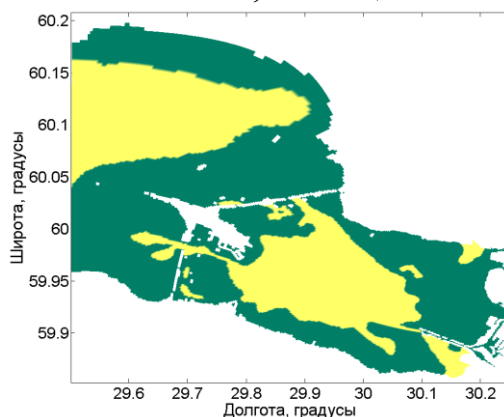


Рисунок 4 – Модельная схема расположения типов донных осадков в исследуемой области. Желтым показаны илы, зеленым – пески

**В разделе 3.6** приводятся результаты модельных расчетов с учетом и без учета влияния плотности взвешенных частиц на плотностную стратификацию. Результаты этих расчетов показали, что в зонах, где происходит взмучивание, картина течений несколько отличается от случая, когда плотность этих частиц никак не учитывается. Происходит локальная перестройка поля течений. Однако максимальные различия при этом не превышали  $5 \text{ см/с}$  и наблюдались лишь в небольших по площади районах вдоль северного побережья Невской губы. В открытых частях акватории в силу отсутствия высоких концентраций взвеси влияния на поле течения практически нет. Что касается влияния данного эффекта на распределение концентрации взвеси, то наблюдается изменение в вертикальном профиле концентрации из-за изменения интенсивности турбулентного обмена (Рис. 5).

**В разделе 3.7** проводится оценка чувствительности модели взмучивания к выбору значений основных эмпирических параметров, а именно к значению коэффициента когезии для илистых донных осадков и доли глинистого материала в донных осадках. Показано, что модель крайне чувствительна к изменению значений этих коэффициентов, определение которых выполняется в работе на основе сравнения результатов расчетов с данными спутниковых измерений.

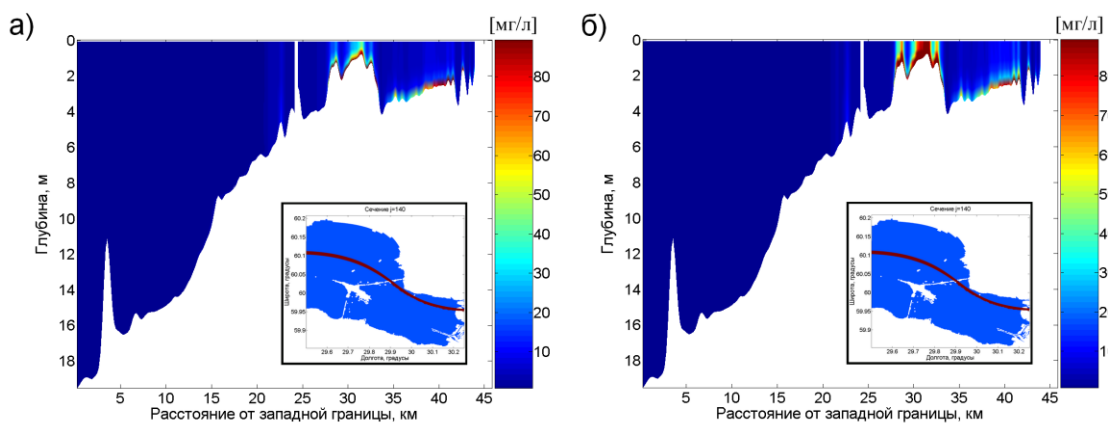


Рисунок 5 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 14 июня 2004 года. Расчеты с учетом (а) и без учета (б) влияния плотности взвешенных частиц на плотностную стратификацию.

На вкладках показано положение вертикального сечения

**В разделе 3.8** приводятся результаты калибровки модели взмучивания посредством сравнения результатов расчетов со спутниковыми оценками поверхностной концентрации суммарного взвешенного вещества (TSM). Получено, что итоговые значения критических напряжений, необходимых для отрыва частиц песка и ила от дна, составили  $0.228$  и  $0.142$   $\text{H}/\text{m}^2$ , соответственно. Эти значения более чем в два (для песка) и в шесть (для ила) раз больше, чем базовые значения критических напряжений для этих частиц, вычисленные без учета когезии. На Рисунке 6 приведено пространственное распределение TSM и вычисленная поверхностная концентрация взвешенного вещества. Спутниковый снимок характеризуется некоторой фоновой концентрацией взвеси (около 2–3 мг/л) повсюду в Невской губе, чего нет в модельных расчетах, если не учитывать поступления взвешенного вещества со стоком Невы. Для проверки влияния речного стока в модель была добавлена третья фракция частиц. Ее поступление в расчетную область задавалось только на восточной границе со стоком речных вод со средней концентрацией 3 мг/л. На рисунке 6б приведен итоговый результат данного расчета.

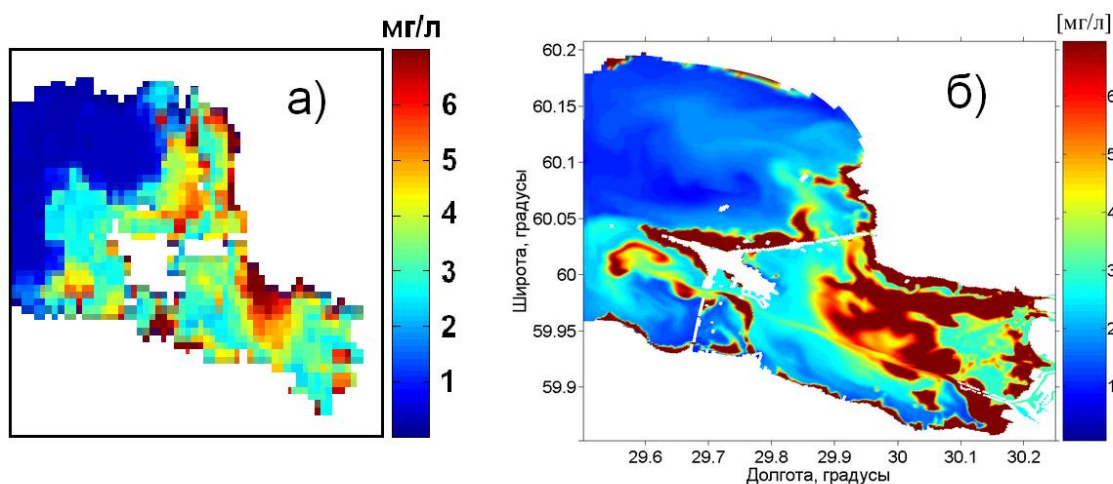


Рисунок 6 – а) Пространственное распределение TSM в Невской губе по спутниковым данным на 10 часов 15 июня 2004 года. б) Рассчитанное поле поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени

Рассчитанные концентрации во вдольбереговой полосе Кронштадта оказались превышены. Это объясняется тем, что, согласно литологической карте, донные осадки вблизи Кронштадта сложены не только песками, но и более грубыми осадками, главным образом гравием и галькой, для которых нужно значительно большее придонное напряжения для их отрыва от дна. В модели же дно в этом районе считается песчаным, в результате чего и происходит наблюдаемое расхождение. В определенной мере различия могут быть связаны с тем, что в модели используется 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. Корректность значений выбранных коэффициентов и общей настройки модели подтверждается также Рисунок 7, при этом значения всех подобранных ранее эмпирических параметров не менялись.



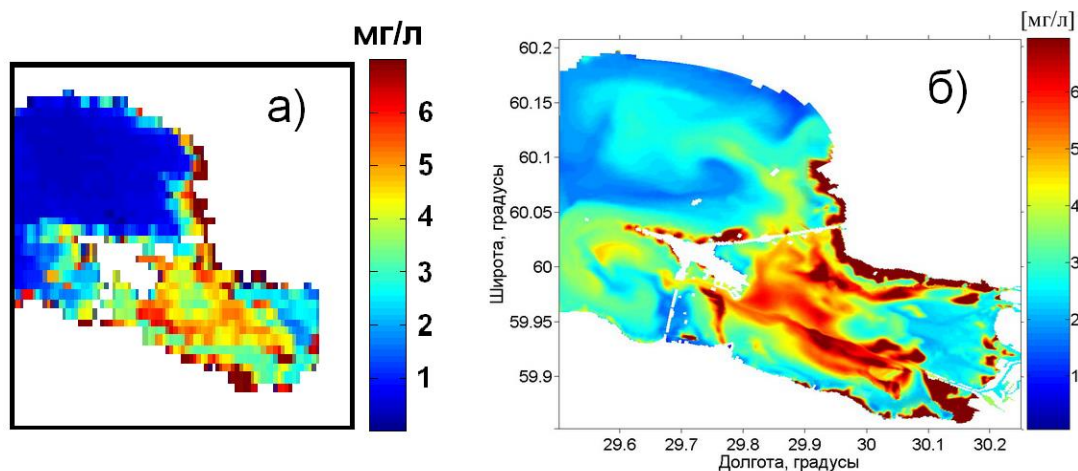


Рисунок 7 – а) Пространственное распределение TSM в Невской губе по спутниковым данным на 11 часов 4 июня 2004 года. б) Рассчитанное поле поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени

**В четвертой главе** приводятся результаты модельных расчетов по взмучиванию донных осадков в Невской губе, проведенные для длительных временных периодов, а именно для безледных периодов 2008 и 2013 годов.

**В разделе 4.1** приводятся статистические данные по метеорологическим наблюдениям на станции Кронштадт, на основе которых в качестве года с сильными ветрами был выбран 2008 год, а со слабыми — 2013 год. Расчеты для обоих лет проводились для безледного периода с 1 мая по 30 ноября.

**В разделе 4.2** приводятся результаты расчетов концентрации взмученного донного вещества в расчетной области для безледных периодов 2008 и 2013 годов. Расчеты показали, что за указанный период 2008 года повышенные поверхностные концентрации взмученного осадочного вещества наблюдались в Невской губе с конца сентября до конца ноября, что характерно, так как в этот период были зарегистрированы сильные ветра западных и юго-западных направлений со скоростью выше 8 м/с. Повышенные значения концентрации наблюдались в основном в прибрежных и мелководных районах, тогда как центральная часть Невской губы была практически свободна от взвеси. Показано, что взмучивание в прибрежных районах Невской губы вызывается преимущественно ветровым волнением, в то время как интенсивность взмучивания на Ломоносовской отмели к югу от острова Котлин сильно зависит от скорости течения в этом районе. Расчеты за 2013 год выявили значительно более низкие концентрации взвешенных частиц во всех районах Невской губы по сравнению с 2008 годом. В среднем, в моменты интенсивного взмучивания в 2008 и 2013 гг. абсолютные значения поверхностной концентрации различались примерно в 5–7 раз.

Помимо анализа временного хода поверхностной концентрации взвеси было оценено и интегральное содержание взвешенного вещества во всей расчетной области (Рис. 8).

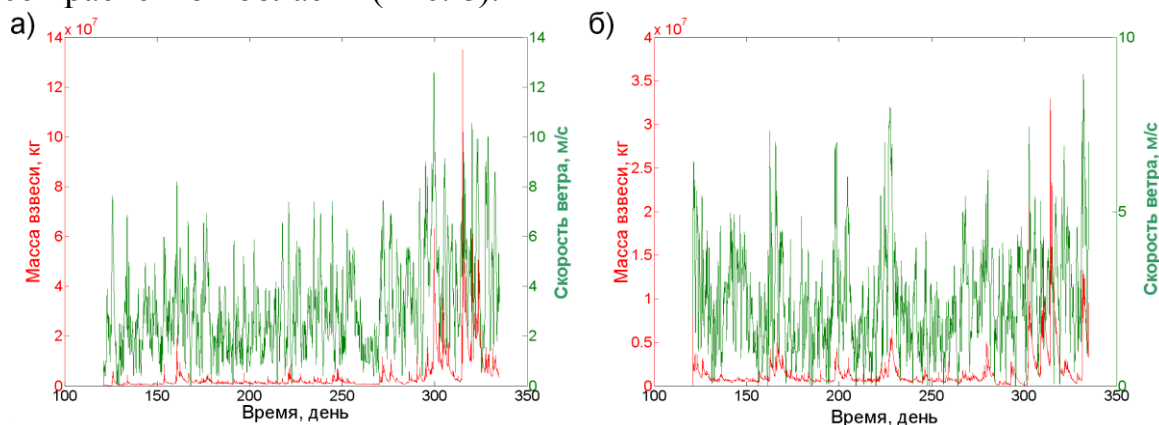


Рисунок 8 – Временной ход рассчитанного суммарного содержания взвешенного вещества (красная кривая) и модуля скорости ветра (зеленая кривая) в модельной области за период 01.05–30.11 для: а) 2008 года; б) 2013 года

Сравнение временного хода концентрации взвеси или ее суммарного содержания и модуля скорости ветра для обоих лет позволяет сделать вывод о том, что не всегда одна и та же скорость ветра приводит к одинаковой интенсивности взмучивания в Невской губе. Важно то, какое направление имеет ветер. Анализ полученных результатов для 2008 и 2013 годов показывает, что наиболее интенсивно взмучивание происходило вдоль северного и восточного побережья Невской губы при ветрах западного и юго-западного направления. Еще раз следует отметить, что помимо воздействия ветровых волн важную роль играет также влияние течения на мелководьях, проявляющееся при значительных колебаниях уровня.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Гидротермодинамическая модель Невской губы и восточной части Финского залива расширена путем добавления в нее модели взмучивания донных и переноса взвешенных осадков. Модель взмучивания учитывает совместное нелинейное взаимодействие придонных напряжений, возникающих под воздействием ветровых волн и течения, когезию донных осадков, переменную скорость оседания взвеси вследствие возможной флокуляции взвешенных частиц и эффекта затрудненного оседания, а также влияние плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию. Для получения характеристик ветрового волнения в исследуемой акватории использована модель SWAN.



2. Получены распределения модуля суммарного придонного сдвигового напряжения, а также распределения модулей придонных напряжений, генерируемых течением и волнением, для различных метеорологических ситуаций. Показано, что для Невской губы при расчете суммарного придонного напряжения следует учитывать не только придонное напряжение, создаваемое ветровым волнением, но и напряжение, генерируемое течением. Максимальный вклад течения, в ряде случаев превосходящий волновое, проявляется в районе Ломоносовской отмели и створах КЗС в периоды значительных колебаний уровня. Также речной сток Невы генерирует придонные напряжения в ее устье. Вместе с тем, придонные напряжения от течения, как правило, локализованы в небольших по площади районах, в то время как ветровое волнение генерирует значительные придонные напряжения на гораздо большей площади, в том числе во вдольбереговой полосе и в центральных районах Невской губы. Таким образом, необходим учет обоих факторов для корректного моделирования процесса взмучивания.

3. На основании сравнения результатов расчетов, в которых задавалась лишь одна фракция донных частиц: либо пески, либо илы, показаны различия в полях их концентраций. Если все дно предполагается исключительно песчаным, интенсивное взмучивание и повышенные концентрации взвеси при сильном ветре имеют место лишь в узкой прибрежной зоне и на отмелях и практически отсутствуют в центральной части Невской губы и в других районах. При задании на дне только ила площади распространения взвеси расширяются, а сами концентрации значительно выше, чем в случае с песчаной фракцией. Установлено, что взвешенные частицы песка оседают практически в тех же районах, где были подняты со дна из-за большей скорости оседания и мелководности района, в то время как взвешенные частицы ила могут переноситься на значительные расстояния. Вместе с тем, взмучивание песчаных осадков, находящихся на мелководье и во вдольбереговой полосе, происходит чаще. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета в модели не менее чем двух фракций донных осадков (песков и илов) с соответствующим пространственным распределением для корректного воспроизведения поля концентрации взвеси в исследуемой области.

4. Установлено, что вертикальные профили взвешенных частиц ила близки к однородным и не имеют существенных максимумов в придонном слое, в то время как профили взвешенных частиц песка демонстрируют значительный рост концентрации с глубиной. Как показали расчеты, в периоды взмучивания в некоторых районах у дна может формироваться нефелоидный слой взвешенных частиц песка, при этом поверхностная концентрация взвеси оставалась крайне низкой в течение всего периода взмучивания.

5. Показано, что учет влияния плотности частиц на плотностную стратификацию приводит к ослаблению вертикального обмена, вследствие чего вертикальный профиль концентрации взвеси становится менее однородным, а поверхностная концентрация взвеси уменьшается по сравнению со случаем, когда влияние плотности частиц не учитывалось. Кроме того, показаны изменения в картине течений при учете и без учета плотности взвеси в модели. Вследствие чего для корректного воспроизведения процесса взмучивания в расчетах необходимо учитывать влияние плотности частиц на общую плотностную стратификацию.

6. Выполнена оценка чувствительности модели взмучивания к значениям основных эмпирических коэффициентов, определяющих интенсивность взмучивания: коэффициента когезии для алевритовых осадков, а также доли содержания глинистой фракции в донных осадках. На основании сравнения результатов расчетов со спутниковыми данными выбраны оптимальные значения этих коэффициентов.

7. Расчеты, выполненные для безледных периодов 2004, 2008 и 2013 годов, показали, что в наибольшей степени взмучиванию подвержена вдольбереговая полоса от города Сестрорецк и вдоль всего северного берега Невской губы и песчаные бары Невы в периоды сильных ветров западного и юго-западного направления. Кроме того, взмучиванию подвержен район Ломоносовской отмели, где интенсивное взмучивание происходит также и в периоды значительных колебаний уровня в Невской губе, вызывающих сильные придонные скорости течения. Помимо этих районов, при сильных ветрах северного или северо-восточного направления взмучивание наблюдается также вдоль всего южного побережья Невской губы от Санкт-Петербурга до КЗС и западнее него. При ветре со скоростью выше 8–10 м/с взмучиваются алевритовые донные осадки в центральных частях Невской губы.

8. На основании расчетов суммарного содержания взвешенного вещества в исследуемой акватории для двух лет, характеризующихся сильными и умеренными ветрами (2008 и 2013 год соответственно), показано, что наиболее интенсивно для обоих лет взмучивание происходило в осенние месяцы с максимумом интенсивности, приходящимся на середину ноября.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях из списка ВАК:**

1. **Мартьянов, С.Д.** Моделирование процесса взмучивания донных осадков в Невской губе [Текст]. / С.Д. Мартьянов, В.А. Рябченко, А.Е. Рыбалко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. - 2011. - Выпуск 20. - С. 13-26.

2. **Мартьянов, С.Д.** Воспроизведение взмучивания и переноса донных осадков в Невской губе на основе трехмерной модели циркуляции [Текст]. / С.Д. Мартьянов, В.А. Рябченко // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. - 2013. - Т. 6, № 4. - С. 32-43.

**Другие публикации:**

3. **Martyanov, S.D.** Modelling of suspended particulate matter transport and its influence upon the primary phytoplankton production in coastal areas [Текст]. / S.D. Martyanov, V.A. Ryabchenko // *Abstract Volume: International workshop «Flood vulnerability and flood protection in tidal and non-tidal regimes: North and Baltic seas»*, Delft, the Netherlands, 2009. - 2009. - p. 28.

4. **Martyanov, S.D.** Modelling of sediment resuspension and transport dynamics in the Neva Bay [Текст]. / S.D. Martyanov, V.A. Ryabchenko, A.E. Rybalko // *Book of Abstracts: Baltic Sea Science Congress 2011, St. Petersburg*. - 2011. - p. 73.

5. **Martyanov, S.** Simulation of the resuspension and transport of bottom sediments in the Neva Bay on the basis of three-dimensional circulation model [Текст]. / S. Martyanov, V. Ryabchenko // *Abstract book: Baltic Sea Science Congress 2013 “New Horizons for Baltic Sea Science”*, Klaipeda 26–30 August 2013. - 2013. - p. 203.

6. **Мартьянов, С.Д.** Математическое моделирование взмучивания донных осадков в Невской губе [Электронный ресурс]. / С.Д. Мартьянов // *Сборник докладов Третьей объединенной конференции молодых ученых и специалистов МАГ-2013 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. Санкт-Петербург. - 2013. - С. 317-319. - (CD-ROM).

7. **Martyanov, S.** Modeling of sediment resuspension in Neva Bay during strong wind events [Электронный ресурс]. / S. Martyanov // *Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES*. - 2014. - pp. 1-5. - DOI: 10.1109/BALTIC.2014.6887882. - Режим доступа: [www.ieeexplore.ieee.org](http://www.ieeexplore.ieee.org)