

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Рябченко В.А.

Санкт-Петербург – 2014

Содержание

	Стр.
Введение.....	3
1 Современное состояние исследований процесса взмучивания донных осадков и основные подходы к его математическому моделированию.....	7
1.1 Взмучивание частиц со дна.....	7
1.2 Гравитационное оседание частиц.....	20
1.3 Влияние наличия в воде взвеси на плотностную стратификацию.....	23
2 Модель циркуляции моря и ее модификация для учета процесса взмучивания.....	26
2.1 Модель циркуляции.....	26
2.2 Модель взмучивания.....	26
2.3 Расчет придонного сдвигового напряжения.....	33
2.4 Расчет параметров ветрового волнения.....	34
3 Результаты моделирования взмучивания донных осадков в Невской губе....	37
3.1 Физико-географическое описание Невской губы.....	37
3.2 Выбор периода и условия расчетов.....	40
3.3 Оценки интенсивности ветрового волнения в Невской губе.....	43
3.4 Расчет придонных напряжений.....	47
3.5 Эффекты пространственного распределения типов донных осадков....	55
3.6 Влияние взвешенных частиц на плотностную стратификацию и скорости течений.....	67
3.7 Чувствительность решения к параметрам когезии донных осадков.....	70
3.8 Калибровка и валидация модели взмучивания.....	74
4 Временная изменчивость взмучивания в Невской губе в безледный период.....	81
4.1 Выбор лет для расчета.....	81
4.2 Сезонные изменения концентрации взвешенного вещества в 2008 и 2013 годах.....	82
Заключение.....	91
Список сокращений.....	94
Список использованных источников.....	95

Введение

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 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 [88], основанная на Принстонской Океанической Модели [30]. Для получения характеристик ветрового волнения использовалась модель SWAN [33]. При параметризации процесса взмучивания использовались подходы, изложенные в работах [2, 99, 110, 111] 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 натурных 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.

1 Современное состояние исследований процесса взмучивания донных осадков и основные подходы к его математическому моделированию

1.1 Взмучивание частиц со дна

На границе раздела вода–дно происходят процессы седиментации и взмучивания. Взмучиванием называется процесс вовлечения частиц донных осадков в водную толщу в результате движения потока над дном. При небольших значениях динамической скорости у дна взвесь опускается и оседает на дно, формируя при этом осадочный слой. При высоких значениях динамической скорости, например, при сильном волнении, это вещество взмучивается и вновь поступает в воду. Поступление взвешенного вещества в воду в прибрежных районах, как правило, происходит в относительно небольших по площади районах вдоль берегов, над мелководными участками акваторий, в местах с высокими скоростями потока с последующим распространением взвеси вследствие адвекции и диффузии [95]. Как правило, с глубиной концентрация взвешенного вещества, поступающего со дна, растет. Это распределение зависит от скорости гравитационного оседания и интенсивности процесса вертикального перемешивания. Скорость оседания отдельной фракции частиц является более или менее постоянной величиной по сравнению коэффициентами вертикального обмена, колебания которых могут быть значительными.

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 [50, 99, 100]. При штормовых условиях кинетическая энергия волн играет основную роль в увеличении поступления взвесей к поверхности в мелководных районах. Течение само по себе в большинстве случаев не может привести к возникновению значительного потока донного осадочного вещества в водную толщу. При наличии же волнения придонная волновая орбитальная скорость увеличивает суммарную динамическую скорость, что ведет к возникновению значительного потока взвешенного вещества со дна, которое дальше переносится

течением [80, 67, 28, 62, 68]. По имеющимся натурным данным о переносе взвешенного вещества было установлено [111], что в мелководных районах при наличии значительного волнения и при 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 [63, 67, 92, 80], в общем случае необходимо учитывать оба механизма генерации суммарного придонного напряжения [100, 67].

В более глубоководных районах, где ветровое волнение уже не вносит существенный вклад в придонное напряжение, взмучивание может вызываться приливными течениями и внутренними волнами, порождаемыми приливами в стратифицированной по плотности жидкости [35, 34]. При этом на глубине образуется относительно тонкий придонный слой с повышенной концентрацией взвеси, называемый нефелоидным слоем, в пределах которого переносится основная масса взмученного осадочного материала, формируя, таким образом, распределение донных осадков на континентальном шельфе [75, 31, 32, 46, 82]. В работе [32], например, приводятся результаты наблюдений за внутренними волнами на Калифорнийском шельфе, и обосновывается их связь с высокими концентрациями взвешенного осадочного вещества во время прохождения волновых пакетов. Относительно неспецифические условия позволяют рассматривать этот процесс как достаточно характерный для многих шельфовых районов Мирового океана. Вывод о влиянии резонансных внутренних волн на перенос донных осадков на основании натурных наблюдений и модельных оценок был сделан и в работе [46], где изучался этот процесс в южной части Балтийского моря у побережья Германии. Однако в этом случае, несмотря на увеличение придонного сдвигового напряжения, энергии внутренних волн было недостаточно для непосредственного отрыва частиц от дна, и внутренние волны лишь в ряде случаев препятствовали осаждению взвеси, поступившей в рассматриваемое место из других районов посредством адвекции.

Помимо естественных причин, вызывать взмучивание донных осадков в некоторых прибрежных районах могут волны, генерируемые проходящими судами. При этом вклад таких волн в районах с развитым судоходством может быть

значительным, что ведет за собой изменения в концентрации взвешенных осадков, как это было показано на примере Таллинского залива в Балтийском море [97, 45].

Любопытные результаты эксперимента по оценке влияния рыб на интенсивность взмучивания донных осадков в одном из мелководных озер в Нидерландах (озеро Wolderwijd) приводятся в работе [90]. В работе было установлено, что рыбы значительно ослабляют сопротивление дна эрозии, возникающей под действием ветровых волн, препятствуя консолидации осадков. Это происходит вследствие того, что в процессе поиска пищи они проделывают небольшие воронки в верхнем слое седиментов. Несмотря на кажущуюся малозначительность этого явления, лабораторные эксперименты показали, что всего двух процентов площади донной поверхности, покрытой такими углублениями, было достаточно для ослабления сопротивления дна эрозии до уровня, соответствующего сопротивлению дна, сложенного еще не консолидированными осадками. Иными словами, если в начале эксперимента еще не консолидированные осадки взмучивались при скорости потока около 25 см/с, а после двух недель – уже только при 50 см/с, то влияние небольших воронок снова снизило необходимую для взмучивания скорость потока до 25 см/с.

Одной из основных характеристик, регулирующих интенсивность взмучивания донных осадков, является критическое придонное сдвиговое напряжение. На его величину оказывают влияние как физические характеристики самих частиц донных осадков, так и наличие в донных осадках мелкозернистых и органических составляющих. Первыми и получившими наибольшее распространение являются экспериментальные результаты А. Шилдса [94], позволяющие по параметрам потока и характеристикам частиц определить критическое напряжение, при котором начинается их движение. Данные были получены в лабораторных условиях для установившегося однонаправленного потока и отсутствия когезии для частиц. Позднее были выполнены работы по изучению процесса взмучивания для осциллирующих неустановившихся потоков [27, 114, 53]. Анализ полученных в подобных исследованиях данных показал, что несмотря на наличие силы инерции в нестационарном потоке, процесс вовлечения частиц в движение все еще в достаточной мере может быть описан при использовании корректно вычисляемого придонного напряжения трения, возникающего вследствие осциллирующего

движения [68, 56]. Поэтому применимыми остаются и результаты Шилдса, связывающие характеристики донных частиц и придонную динамическую скорость, при которой начинается их движение. На Рисунке 1.1.1а представлена так называемая кривая Шилдса, связывающая безразмерное придонное напряжение θ , называемое также параметром Шилдса, со значением числа Рейнольдса для частиц Re :

$$\theta = \frac{U_*^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)gd} \quad (1.1.1)$$

$$Re = \frac{U_*d}{\nu} \quad (1.1.2)$$

где U_* – значение динамической скорости у дна, м/с, ρ_s – плотность частиц, кг/м³, ρ_w – плотность воды, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с², d – диаметр частиц, м, ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с. По этой кривой уже можно определить критическую динамическую скорость, при которой частицы начинают движение.

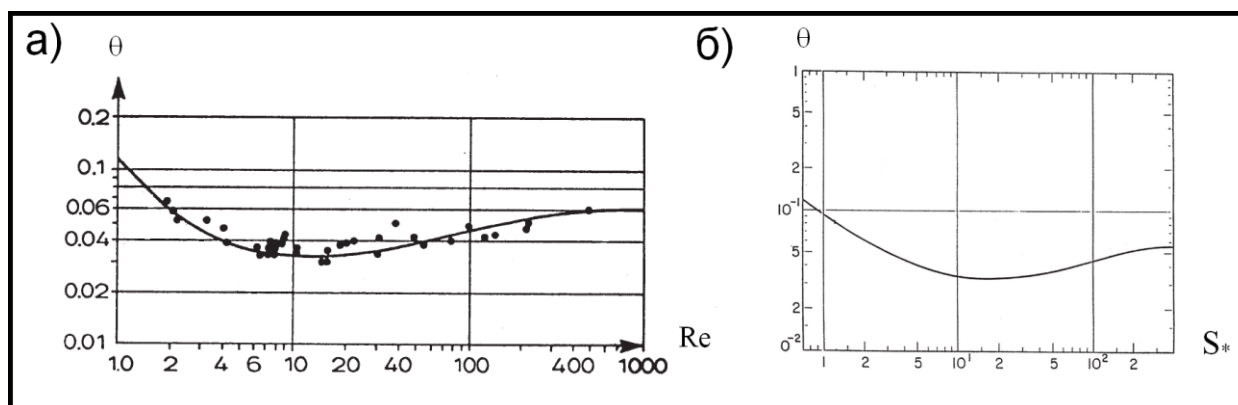


Рисунок 1.1.1 – (а) Классический вид кривой Шилдса, точками показаны результаты лабораторных измерений; (б) Альтернативный вид кривой Шилдса. Изображения из работы [66]

Выражение (1.1.1) для параметра Шилдса получается при решении задачи о начале движения частицы, покоящейся до этого на дне, на которую действует обтекающий ее поток. В задаче полагается, что на частицу при этом, помимо сил тяжести и Архимеда, действуют также нормальные и тангенциальные компоненты

силы трения, которые способствуют ее подъему и движению в потоке. При этом в качестве стабилизирующей силы используется сила трения частицы о дно [66].

К сожалению, присутствие множителя динамической скорости U_* на обеих осях на Рисунке 1.1.1а делает ее определение для конкретного типа частиц неудобным, вследствие чего в работе [68] была предложена альтернативная форма этой кривой, связывающая параметр Шилдса не со значением числа Рейнольдса для частиц, а с некоторым параметром S_* , зависящим непосредственно от физических свойств жидкости и самих частиц:

$$S_* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)gd} \quad (1.1.3)$$

Указанная зависимость представлена на Рисунке 1.1.1б, и по ней уже легко определяется придонное напряжение, при котором начинается движение частиц. Вообще, исходя из физики самого процесса, британским ученым Ральфом Багнольдом еще в 1966 году в работе [26] было сделано предположение, что взмучивание и нахождение частиц во взвешенном состоянии должно происходить при превышении вертикальной компонентой скорости жидкости, возникающей вследствие турбулентных вихрей, скорости оседания взвешенных частиц W_s . Если при этом положить, что максимальное значение вертикальной компоненты близко по величине к придонной динамической скорости [109, 52], то упомянутое предположение как критерий формулируется просто как $U_{*,cr}/W_s = 1$. Другой критерий был предложен в работе [44], а именно $U_{*,cr}/W_s = 0.25$. Сравнительный анализ этих и других результатов по инициации взмучивания приводится в работе [109]. Там же отмечается, что критерий Шилдса, в принципе, можно рассматривать как нижний порог величины придонной динамической скорости, при которой начинается движение частиц, а критерий Багнольда – как верхний.

Позднее были предложены другие эмпирические зависимости, дающие более точные оценки критического напряжения, в том числе и для мелкозернистых частиц песка [73]. Дальнейшее уточнение значения критического напряжения возможно при включении в рассмотрение наличия глинистого и органического материала в донных осадках. Результаты натурных наблюдений [76] позволяют сделать вывод, что

когезия (сцепление частиц) донных осадков в случае частиц диаметром более 62 мкм вызвана наличием в осадках глинистого материала, что приводит к обволакиванию таких частиц тонким слоем глины и их слипанию. Когезия способствует увеличению критического напряжения, необходимого для отрыва частиц от дна. Результаты экспериментов с частицами диаметром менее 62 мкм [86] показали, что, начиная приблизительно с этого диаметра, дальнейшее уменьшение размеров частиц приводит к росту критического напряжения, что объясняется усилением когезии [110].

Классической постановкой задачи о взмучивании частиц со дна в одномерном случае является уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[C(W_s - W) + \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (1.1.4)$$

где C – объемная концентрация взвешенных частиц, $\text{м}^3/\text{м}^3$, t – время, с, z – вертикальная координата, отсчитываемая вверх от дна, м, W_s – скорость гравитационного оседания, м/с, W – вертикальная компонента скорости движения жидкости, м/с, ε_s – коэффициент диффузии для взвешенных частиц, $\text{м}^2/\text{с}$. Данная задача упрощается, если рассматривать стационарный установившийся процесс и полагать скорость оседания и динамическую скорость у дна постоянными, а коэффициент вертикального турбулентного обмена задать в виде параболической функции по глубине. При этом на нижней границе $z=a$ над самым дном ставится условие равенства рассчитываемой концентрации некоторой известной: $C|_{z=a} = C_a$. В результате, решением упрощенного таким образом уравнения (1.1.4) будет выражение для вертикального профиля концентрации $C(z)$, известного также как вертикальный профиль Роуза:

$$C(z) = C_a \left[\frac{(H-z)a}{(H-a)z} \right]^{\frac{W_s}{\kappa U_*}} \quad (1.1.5)$$

где C_a – объемная концентрация частиц на нижнем отсчетном уровне, $\text{м}^3/\text{м}^3$, a – высота отсчетного уровня над дном, м, H – глубина, м, κ – постоянная Кармана, U_* – динамическая скорость у дна, м/с. Показатель степени $\frac{W_s}{\kappa U_*}$ в формуле (1.1.5) называется числом Роуза. По его величине можно качественно судить о характере переноса осадков в жидкости, будь то придонный перенос в слое сальтации или

нефелоидном слое, или же перенос взвешенных в толще воды осадков с разной степенью взаимодействия с дном.

Профиль Роуза в общем случае качественно правильно передает основную закономерность вертикального распределения концентрации взвеси, выраженную в нелинейном увеличении концентрации по направлению ко дну, где находится ее источник. Тем не менее, в естественных природных условиях сделанные допущения не позволяют корректно воспроизводить распределение концентрации в силу как нестационарности самого процесса в условиях постоянно меняющегося внешнего форсинга, так и из-за переменных значений коэффициента турбулентного обмена и, в общем случае, скорости гравитационного оседания, не говоря уже о трехмерном характере самой задачи. В результате, возникает необходимость в численном решении уравнения (1.1.4). Данное уравнение дополняется начальными и граничными условиями. В качестве начальных условий обычно задается либо нулевая концентрация в столбе жидкости $C(z, 0) = 0$, либо какой-то заранее известный вертикальный профиль $C(z, 0) = C_0(z)$. В качестве граничных условий обычно используются или условия второго рода с заданием потоков взвеси, или смешанные, так как в большинстве случаев нет данных о непосредственной концентрации на верхней и нижней границах, в то время как, исходя из общих физических соображений, можно описать поведение потоков вещества на них.

При непосредственном изучении процесса взмучивания на верхней границе $z = H$ используется равенство нулю потока взвешенного вещества, так как единственным источником взвеси считается дно, то есть:

$$C(W_s - W) + \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = H \quad (1.1.6)$$

Для задания нижнего граничного условия могут быть использованы различные подходы, и к настоящему времени в литературе опубликовано большое число методов для учета поступления взвеси в воду со дна. В силу того что на сам процесс взмучивания влияют множество факторов, от характеристик потока до формы частиц и состава донных осадков, многие из предложенных подходов основаны на использовании эмпирических или полуэмпирических зависимостей, о которых будет сказано далее.

Ниже приводится краткий аналитический обзор некоторых существующих и использующихся методик для задания нижнего граничного условия, а также моделей, в которых применялся тот или иной подход, с целью оценить их эффективность. В частности, в работе [67] описываются результаты применения квазитрехмерной модели взмучивания и переноса взвешенного вещества для озера Мичиган. В качестве нижнего граничного условия там задается поток взвеси F_a в виде:

$$F_a = W_s (E_s - C_a \cos \theta_b) \quad (1.1.7)$$

где θ_b – наклон дна, рад, E_s – безразмерный коэффициент, описывающий вовлечение донных осадков в состояние взвеси под действием турбулентности, C_a – придонная концентрация, рассчитываемая по формуле [108]:

$$C_a = 0.015 \frac{d}{a} \frac{T_*}{D_*^{0.3}} \quad (1.1.8)$$

где $T_* = (\tau_b - \tau_{cr}) / \tau_{cr}$ и $D_* = d \left((\rho_s / \rho_w - 1) g v^{-2} \right)^{1/3}$ — безразмерные параметры придонного сдвигового напряжения и размера частиц соответственно, τ_b – суммарное придонное сдвиговое напряжение, Н/м², τ_{cr} – критическое значение придонного напряжения, при котором начинается отрыв частиц от дна, Н/м². Коэффициент E_s в формуле (1.1.7) рассчитывался по соотношениям [48]:

$$E_s = \frac{AZ^5}{1 + \frac{A}{0.3} Z^5}, \quad Z = \frac{U_*}{W_s} R^{0.6}, \quad R = \frac{d}{v} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d} \quad (1.1.9)$$

где $A = 1.3 \times 10^{-7}$ – эмпирический коэффициент, U_* – динамическая скорость у дна, м/с. Подбор эмпирических параметров модели производился на основании калибровки модели по имеющимся для южной части озера данным наблюдений за концентрацией взвеси, а также мутностью. Проведенные расчеты для ноября–декабря 1994 года показали, что модель неплохо воспроизводит основные наблюдавшиеся моменты интенсивного взмучивания, хотя часто недооценивает наблюдавшиеся концентрации взвеси в периоды интенсивного взмучивания и переоценивает величины концентрации взвеси в остальное время. Серьезным недостатком модели является учет в ней лишь одной фракции частиц диаметром 30 мкм, в то время как в действительности имеет место значительная пространственная неоднородность поля донных осадков в озере Мичиган [67, 38]. Кроме того, в модели не учитывается

поступление взвеси с речным стоком, когезия донных осадков, флокуляция, поступление взвеси вследствие эрозии берегов, а также предполагается неизменность скорости гравитационного оседания частиц и неограниченный источник взвеси на дне. Вследствие известных трудностей в определении критического значения придонного напряжения в модели оно задавалось постоянным, что для проводимого исследования с единственной фракцией частиц вполне обосновано, но не может использоваться в более общем случае или для другого физического объекта. В более поздних исследованиях процесса взмучивания в озере Мичиган [36] ряд недостатков был устранен путем использования более сложных моделей ECOMSED [19] и SEDZL [47]. При этом уже учитывались две фракции частиц, когезия мелкозернистых осадков, различия в вертикальной структуре донных осадков (рассматривалось 3 слоя дна с различными свойствами), принималось во внимание время пребывания частиц в виде уже сформировавшихся донных осадков. Перемешивание слоев друг с другом не учитывалось. Использование способа описания донных осадков, использующегося в модели SEDZL, позволило учитывать для каждого узла расчетной сетки различия в соотношении частиц двух разных фракций. На нижней границе ставились условия для количества вовлеченных частиц с единицы поверхности дна вследствие эрозии E и для потока частиц вниз D под действием гравитационного опускания:

$$E = \begin{cases} \frac{a_0}{t_d^n} \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right)^m, & \tau_b > \tau_{cr} \\ 0, & \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (1.1.10)$$

где a_0 , m , n – эмпирические параметры, значения которых подбирались по данным наблюдений, t_d – время, прошедшее после осаждения, дни;

$$D = \sum_{k=1}^2 p_k W_{sk} C_k \quad (1.1.11)$$

где p_k – вероятность осаждения частицы k -й фракции, W_{sk} – скорость оседания частиц k -й фракции, C_k – концентрация частиц k -й фракции. Таким образом, полагалось, что, согласно формуле (1.1.10), чем дальше осажденные частицы находятся в виде донных отложений, тем сложнее вновь вовлечь их во взвешенное состояние. Несмотря на то что использованные модели ECOMSED и SEDZL позволяли учитывать концентрацию взвеси при расчете скорости ее оседания, в работе скорость оседания задавалась постоянной для каждой из двух фракций

вследствие необходимости использования этих значений в качестве варьируемых параметров для достижения большего согласия с данными наблюдений. Хотя описанная модель калибровалась на основе относительно полных данных о концентрации взвеси и потоке осаждающихся частиц, на практике при сравнении результатов расчетов с измеренными концентрациями на трех станциях оказалось, что в ряде случаев модель переоценивает величины концентрации в 3–4 раза, хотя качественно пики повышенных концентраций совпадают по времени с пиками, зарегистрированными на станциях наблюдений.

Иначе задавалось нижнее граничное условие в модели взмучивания и осаднения взвеси в устье Амазонки в работе [117]. На нижней границе задавались потоки для оседающих на дно и взмучивающихся частиц в следующем виде. Для задания потока взвеси D , которая, достигнув дна, осаждается на него, использовалось выражение, аналогичное с используемым в работе [36]:

$$D = -p_s W_s C \quad (1.1.12)$$

где $p_s = [1, 0]$ – вероятность того, что частица, достигнув дна, останется на нем. Для потока взвеси E , взмучивающегося со дна в процессе эрозии, бралась формула:

$$E = E_N (\tau_b - \tau_{cr})^\xi \quad (1.1.13)$$

где E_N – наклон кривой функции $E = f([\tau_b - \tau_{cr}]^\xi)$, с/м, ξ – эмпирический коэффициент. В работе также отмечается, что использование уравнения (1.1.13) приводит к завышенным модельным концентрациям в том случае, если при расчетах не учитывается ослабление турбулентности вследствие наличия в воде взвеси. К сожалению, величины коэффициентов E_N и ξ находятся лишь при наличии данных натурных наблюдений для конкретного района.

В работе [82] при моделировании взмучивания и переноса взвешенного вещества на северо-западе австралийского шельфа внутренними приливами поступление донных осадков в воду задавалось в виде потока E :

$$E = \begin{cases} M \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right), & \tau_b > \tau_{cr} \\ 0, & \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (1.1.14)$$

где M – константа взмучивания, кг/(м² с). Поток взвеси D , возникающий вследствие гравитационного оседания, рассчитывался согласно формуле:

$$D = \begin{cases} CW_s \left(\frac{\tau_{cr} - \tau_b}{\tau_{cr}} \right), & \tau_b < \tau_{cr} \\ 0, & \tau_b \geq \tau_{cr} \end{cases} \quad (1.1.15)$$

Несмотря на относительную простоту в задании нижнего граничного условия в этом примере, его использование в общем случае требует серьезной калибровки модели для определения значений эмпирических параметров. В силу того что исследование в работе [82] носило теоретический характер, уточнения этих значений не проводилось. Кроме того, не учитывалось влияние наличия взвеси на изменение плотностной стратификации придонного погранслоя. Рассматривалась лишь одна фракция донных частиц, без учета когезии донных осадков, влияющей на величину критического напряжения. Также скорость оседания частиц задавалась постоянной и не зависящей от концентрации взвеси. Сходным же образом задавался поток частиц со дна E и в работе [51] при моделировании взмучивания донных осадков в озере Сен-Клер в Северной Америке, но с соответствующей поправкой на различные значения эмпирического параметра M и дополнительного показателя степени для выражения в скобках в формуле (1.1.14). При этом поток оседающих частиц D рассчитывался просто как произведение концентрации и скорости оседания $W_s C$.

В 2007 году была опубликована работа, в которой были отражены результаты по воспроизведению процесса взмучивания и переноса донных осадков на юге калифорнийского шельфа в заливах Санта-Моника и Сан-Педро [28]. В ней в модели взмучивания рассматривались две фракции донных частиц, для которых отдельно решалось свое адвективно-диффузионное уравнение. При этом на нижней границе задавался поток для j -й фракции оседающих частиц D_j в форме:

$$D_j = -W_{sj} C_j \quad (1.1.16)$$

а поток вовлекающихся со дна частиц E определялся как

$$E_j = \begin{cases} E_{0,j} (1-p) f_j \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr,j}} - 1 \right), & \tau_b > \tau_{cr,j} \\ 0, & \tau_b \leq \tau_{cr,j} \end{cases} \quad (1.1.17)$$

где E_o – скорость вовлечения, определяемая эмпирически, кг/(м² с), p – пористость, f_j – объемная доля j -й фракции.

Таким образом, представленный выше краткий обзор некоторых подходов к математическому моделированию процесса взмучивания, а более конкретно – к заданию условия на нижней границе, позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев вертикальный поток частиц со дна так или иначе параметризуется через соотношение между фактическим придонным и критическим сдвиговым напряжениями.

Как правило, моделирование процесса взмучивания в общем случае при учете совместного действия течения и волн выполняется с использованием осредненных по волновому циклу параметров волн, в частности, значений придонной орбитальной скорости и, соответственно, суммарного придонного сдвигового напряжения. Однако в ряде исследований, например, в работах [40, 104, 69, 41, 103], рассматривалась структура придонного погранслоя с содержащейся в нем взвесью внутри волнового цикла с целью более детально и по возможности точно представить вертикальное распределение скорости и концентрации у дна. Полученные результаты исследований неплохо согласуются с данными наблюдений, большинство из которых являются лабораторными [54, 42]. К наиболее явным недостаткам данного подхода можно отнести решение задачи, как правило, лишь для одномерного случая. Несмотря на то что ряд исследований [40, 69, 41] носили преимущественно теоретический характер, в моделях использовалось большое количество эмпирических параметров, значения которых в общем случае требуют уточнения. Кроме того, внедрение подобных подходов к описанию придонного погранслоя в полные трехмерные модели для конкретного реального природного объекта потребовало бы существенных вычислительных мощностей при использовании высокого пространственного разрешения и очень малого шага по времени. Наконец, широко используемые в настоящее время модели ветрового волнения, такие как спектральные модели WAM [101], WAVEWATCH III [105] и SWAN [33, 85] позволяют получать лишь осредненные характеристики волнения, чего недостаточно для изучения процессов на временных масштабах менее волнового периода, и пространственных масштабах менее длины волны.

Следует также отметить, что учет в модельных расчетах нескольких фракций донных осадков приводит к лучшим результатам, что было показано во многих проведенных исследованиях (см., например, [36, 37]).

Существенным недостатком многих имеющихся моделей, показывающих неплохие результаты по воспроизведению поля концентрации в отдельных районах, является их узкая применимость. При наличии данных натурных наблюдений в ряде случаев удастся весьма удачно подобрать значения эмпирических коэффициентов, в результате чего модель дает близкие к реальным результаты. Однако использование этой же модели, но уже для другого физического объекта или даже лишь при изменении каких-либо внутренних свойств системы либо внешнего воздействия, часто приводит к существенным ошибкам и значительным отличиям рассчитанных значений от наблюдаемых. В этом ключе решение данной проблемы видится в следующем. Это, во-первых, разработка строгой математической теории для описания взмучивания частиц, которая учитывала бы все возможные эффекты и частные случаи и была бы по возможности более общей по сравнению со всеми имеющимися в настоящее время моделями. Но создание такой модели, а тем более ее оперативное применение, видится маловероятным вследствие самой специфики описываемого процесса. Точный математический учет таких, по сути, случайных параметров, как форма частиц, в некоторой степени их размер и положение, не говоря уже о таких специфических процессах как флокуляция и коагуляция, затрудненное оседания, когезия, крайне затруднен.

В качестве альтернативы видится использование некоторой полуэмпирической модели взмучивания, основывающейся на обширной базе натурных и лабораторных наблюдений, посредством которых был бы произведен оптимальный выбор значений используемых в модели эмпирических параметров. При этом постепенное включение в такую модель все большего числа учитываемых процессов с их последующей балансировкой по экспериментальным и натурным данным может являться ключом к решению проблемы моделирования процесса взмучивания для большинства практических задач с широким спектром изменяющихся параметров системы. Представляется, что одной из таких моделей можно считать модель взмучивания и переноса донных осадков TRANSPOR2004, разработанную в Нидерландах [110, 111, 112, 113], в основе которой лежит анализ и параметризация большого количества лабораторных и натурных данных о качественных и количественных характеристиках процесса взмучивания, формировании основных форм донного рельефа, а также переносе осадков.

1.2 Гравитационное оседание частиц

На концентрацию взвеси в воде оказывает влияние не только интенсивность взмучивания со дна, но и процесс гравитационного оседания взвешенных частиц. Оседая в жидкости, отдельная частица через некоторое время приобретает относительно постоянную скорость, называемую скоростью оседания, вследствие достижения баланса между силой тяжести F_G , силой Архимеда F_A и силой трения F_D между частицей и окружающей жидкостью. Объединяя силу тяжести и силу Архимеда $F_{GA} = F_G + F_A$, можно в простейшем виде записать условие равномерного опускания:

$$F_{GA} = F_D \quad (1.2.1)$$

Для сферической частицы диаметра d имеем:

$$(\rho_s - \rho_w)g \frac{\pi d^3}{6} = \frac{1}{2} \rho_w C_D \frac{\pi d^2}{4} W_s^2 \quad (1.2.2)$$

где ρ_w – плотность воды, кг/м³, ρ_s – плотность частицы, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с², C_D – коэффициент сопротивления, W_s – скорость оседания, м/с. Выражая W_s , получаем:

$$W_s = \sqrt{\frac{4 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d}{3 C_D}} \quad (1.2.3)$$

Коэффициент сопротивления C_D зависит от размера и формы частицы, скорости потока и вязкости жидкости. Он может быть определен в зависимости от типа движения по числу Рейнольдса [66, 107]:

$$\text{Re} = \frac{W_s d}{\nu} \quad (1.2.4)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с. Для ламинарного движения частицы с числом Рейнольдса менее 1.0 (согласно [107]) или 0.5 (согласно [66]) $C_D = \frac{24}{\text{Re}}$, в результате скорость оседания определяется по формуле:

$$W_s = \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d^2}{18 \nu} \quad (1.2.5)$$

Это известное выражение для скорости оседания, вытекающее из закона Стокса для равномерно опускающейся сферической частицы в вязкой жидкости.

Вне диапазона Стокса ($Re > 1$) величина коэффициента C_D уменьшается. Зависимость C_D от числа Рейнольдса нелинейная и иногда называется стандартной кривой коэффициента сопротивления. По экспериментальным данным [23] для диапазона $1 < Re < 500$ получено, что $C_D \approx 18.5 Re^{-0.6}$, хотя к настоящему времени предложено большое количество более сложных эмпирических формул для расчета коэффициента сопротивления. Для турбулентного движения с числом Рейнольдса $500 < Re < 2 \times 10^5$ величина C_D для сферической частицы практически постоянна и по результатам экспериментов составляет $C_D \approx 0.4$ [66, 107].

Приведенные выше соотношения применимы лишь для частиц сферической или близкой к сферической формы. В реальных природных условиях донные частицы могут иметь любую форму, поэтому коэффициент сопротивления и, соответственно, скорость гравитационного оседания, будут иными. При этом зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса может меняться качественно [21, 107]. Поэтому широкое применение нашли различные эмпирические формулы для расчетов скорости оседания, полученные по результатам лабораторных экспериментов.

При оседании не одной, а множества частиц, составляющих взвесь, они могут взаимодействовать друг с другом, в результате чего скорость их опускания изменяется. Это явление называется затрудненным оседанием (hindered settling). Экспериментально установлено, что высокие концентрации взвешенного вещества приводят к тому, что частицы взвеси не могут свободно опускаться вниз под действием силы тяжести, а испытывают на себе затормаживающее воздействие окружающих частиц, обусловленное изменением характеристик потока вокруг каждой отдельно взятой частицы при ее движении, а также увеличением общей плотности и вязкости жидкости. В настоящее время предложено несколько эмпирических зависимостей, позволяющих учесть указанный эффект и его влияние на скорость гравитационного опускания [83, 84, 70, 77, 107, 119, 117]. Однако сравнительный анализ нескольких таких зависимостей показывает, что, в целом, они дают близкие друг к другу результаты [111]. На Рисунке 1.2.1 в качестве примера показан эффект влияния затрудненного оседания на скорость опускания частиц. По

оси абсцисс отложена относительная концентрация – отношение текущей объемной концентрации взвеси к объемной концентрации частиц в неподвижных донных осадках, по оси ординат отложена относительная скорость оседания – отношение текущей скорости оседания частиц при затрудненном оседании к скорости оседания единственной частицы в чистой воде.

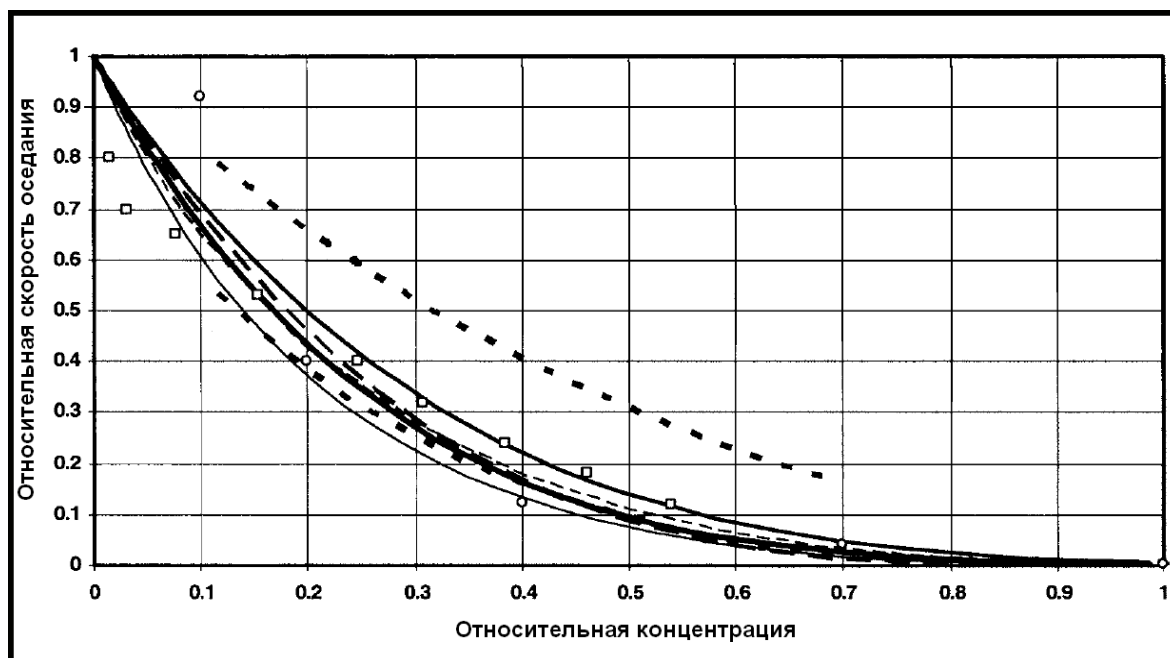


Рисунок 1.2.1 – Влияние эффекта затрудненного оседания на скорость гравитационного опускания частиц взвеси. Маркерами показаны результаты измерений, линиями – их аппроксимация различными эмпирическими формулами.

Рисунок из статьи [111]

Помимо отмеченного выше существует и другой процесс, изменяющий скорость оседания частиц. При нахождении в воде во взвешенном состоянии частиц малого диаметра (менее 32 мкм) часто наблюдается их слипание, или флокуляция. Результаты натурных наблюдений в устьях некоторых китайских рек [64, 65, 93], а также в устьях рек Амазонки [117] и Северн [102] отчетливо демонстрируют данный эффект. Наиболее интенсивно флокуляция происходит в соленой и солоноватой воде. Флокуляция влечет за собой рост эффективного диаметра частиц при увеличении концентрации взвеси и приводит к росту скорости оседания, что требует введения соответствующей поправки. На Рисунке 1.2.2 показана зависимость скорости оседания от концентрации взвеси, полученная по результатам лабораторных

экспериментов и натурных наблюдений за концентрацией взвешенного осадочного вещества в дельте Амазонки [117].

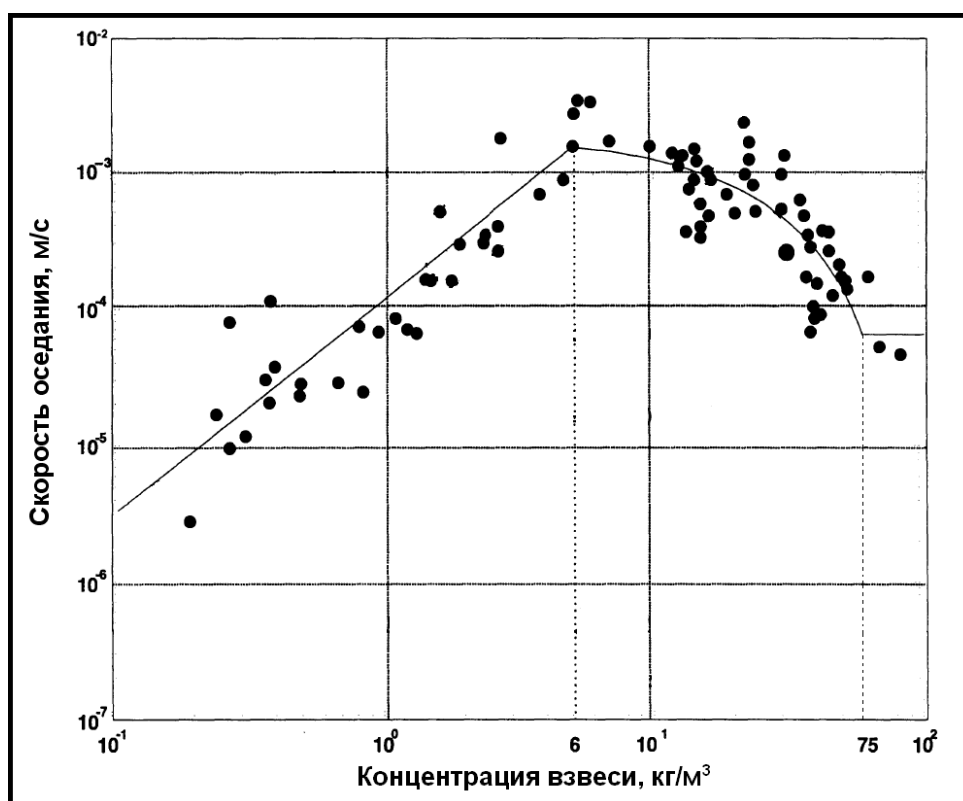


Рисунок 1.2.2 – Зависимость скорости гравитационного оседания взвешенных частиц от концентрации. Точками показаны результаты лабораторных и натурных измерений, сплошной линией — их аппроксимация эмпирическими зависимостями.

Рисунок из статьи [117]

Из Рисунка 1.2.2 видно, что с ростом концентрации до 6 кг/м^3 скорость оседания растет, что является следствием образования флокул, оседающих быстрее отдельных частиц. Дальнейший рост концентрации приводит к уменьшению скорости оседания, так как уже начинают сказываться эффекты затрудненного оседания.

1.3 Влияние наличия в воде взвеси на плотностную стратификацию

Частицы взвешенного вещества, обладая собственной плотностью, отличной от плотности окружающей жидкости, приводят к тому, что общая плотностная стратификация изменяется. Это приводит, во-первых, к изменениям в распределении течений, а во-вторых, к изменению интенсивности турбулентного перемешивания и, следовательно, всех остальных термогидродинамических характеристик, поэтому в

уравнения дополнительно приходится вводить член, описывающий распределение концентрации взвеси. В частности, известен так называемый эффект самоподдерживающихся течений, когда вследствие взмучивания придонным потоком частиц его средняя плотность увеличивается, в результате чего возникающий при этом градиент плотности может приводить к ускорению движения потока над наклонным дном [29].

В работе [117] по результатам сравнения вертикальных профилей скорости течения и концентрации взвешенного вещества делается вывод о значительном влиянии высоких (до 100 кг/м^3) концентраций взвеси на характер распределения скорости в придонном погранслое. Было установлено, что профиль скорости в этом случае близок не к логарифмическому, а к линейному, что более характерно для вязкого, а не турбулентного погранслоя. Действительно, в работе [116] также было показано, что турбулентная вязкость в придонном слое с крайне высокой концентрацией взвеси близка к молекулярной вязкости, в результате чего и наблюдается указанный близкий к линейному профиль придонной скорости. Аналогичные выводы сделаны в работах [115] и [120], но для несколько более низких концентраций: было показано, что при превышении концентрацией 40 кг/м^3 , турбулентность ослабляется настолько существенно, что диффузия происходит в основном лишь за счет молекулярной вязкости смеси. По результатам натурных наблюдений в заливе Ханчжоу в Китае в работе [39] авторы также делают вывод, что при высоких концентрациях взвеси (более 5 кг/м^3) необходимо учитывать влияние взвешенных частиц на ослабление интенсивности турбулентности. Аналогичные выводы сделаны в работе [20] при изучении динамики придонного погранслоя, содержащего взвешенные осадки. Было установлено, что наличие взвеси приводит к ослаблению придонных течений и изменению их вертикального профиля из-за ослабления турбулентного обмена, вызванного усилением плотностной стратификации. В результате, величина придонного сдвигового напряжения уменьшалась примерно на 45% по сравнению со случаем без содержания взвеси.

Взмучивание донных осадков может влиять и на первичную продукцию фитопланктона. Установлено (см., например [55]), что, с одной стороны, взвесь препятствует проникновению в толщу воды фотосинтетически активной радиации, тем самым снижая рост фитопланктона, но, с другой стороны, данное замедление

может компенсироваться повышенным содержанием биогенов, поступивших со дна. В экологическом плане данный вопрос также важен, так как помимо биогенов, в донных отложениях могут присутствовать загрязняющие вещества, которые в периоды интенсивного взмучивания могут поступать в вышележащие слои воды [43, 91].

2 Модель циркуляции моря и ее модификация для учета процесса взмучивания

2.1 Модель циркуляции

В настоящей работе используется трехмерная модель общей циркуляции океана Принстонского университета (Princeton Ocean Model – POM) [30]. Модель имеет в вертикальном направлении σ -координату, представляющую собой множество топологически идентичных слоев постоянной или переменной толщины. Вследствие зависимости σ -координаты от глубины модель позволяет исследовать процесс взмучивания даже в мелководной прибрежной зоне. Используемая горизонтальная расчетная сетка – неравномерная, квазиортогональная, с разнесенными узлами в виде сетки Аракавы типа C [24]. Для получения коэффициентов вертикального турбулентного обмена используется модель турбулентного замыкания Меллора-Ямады уровня 2.5 [72]. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена вычисляется по формуле, предложенной Смагоринским [96]. Плотность морской воды рассчитывается по уравнению состояния УС-80 [25]. С подробным описанием последней версии модели можно ознакомиться в руководстве [71].

Модель приводится в движение атмосферными воздействиями, включающими скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха в приводном слое атмосферы, балл облачности и атмосферное давление на уровне моря. В зависимости от конфигурации расчетной области задаются соответствующие граничные условия [71].

2.2 Модель взмучивания

С целью учета взмучивания, оседания и транспорта взвешенных минеральных донных частиц модель циркуляции была дополнена следующим адвективно-диффузионным уравнением для концентрации взвеси, записанным при использовании преобразования к σ -координате [6, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C(W - W_s)}{\partial \sigma} = \\ = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[DA_H \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[DA_H \frac{\partial C}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

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 (при $\sigma \rightarrow 0$) принимается условие равенства нулю потока взвешенного вещества:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} + W_s C = 0, \quad (2.2.2)$$

На нижней границе (при $\sigma \rightarrow -1$) в модели обеспечена возможность выбора одного из двух вариантов граничных условий:

1) задание потока взвешенного вещества [2]:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} + W_s C = W_s (C - C_a), \quad (2.2.3)$$

либо

2) задание непосредственно значения самой концентрации:

$$C = \begin{cases} C_a, & \tau_b > \tau_{cr} \\ 0, & \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases}, \quad (2.2.4)$$

где τ_b – придонное сдвиговое напряжение, обусловленное совместным действием волн и течений, $\text{Н}/\text{м}^2$, τ_{cr} – критическое значение сдвигового напряжения, при котором начинается процесс взмучивания, $\text{Н}/\text{м}^2$, C_a – объемная концентрация взвешенных частиц на нижнем отсчетном уровне, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

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 формуле (2.2.4) 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

соотношением (2.2.3) представляется более корректным, и оно было использовано во всех дальнейших расчетах.

Значение концентрации на отсчетном придонном уровне рассчитывалось по методике, предложенной в работе [111]:

$$C_a = 0.015(1 - p_{clay})f_{silt}\left(\frac{d_{50}}{a}\right)\frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}}, \quad (2.2.5)$$

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 и D_* – безразмерные параметры придонного сдвигового напряжения и размера частиц соответственно, вычисляемые по формулам:

$$T = \frac{(\tau_b - \tau_{cr})}{\tau_{cr}} \quad (2.2.6)$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (2.2.7)$$

где ρ_s – плотность частиц осадочного материала, кг/м³, ρ_w – плотность воды, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с², ν – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Для вычисления илового показателя f_{silt} используется формула:

$$f_{silt} = \begin{cases} \frac{d_{sand}}{d_{50}}, & d_{50} \leq d_{sand} \\ 1, & d_{50} > d_{sand} \end{cases}, \quad (2.2.8)$$

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

Высота отсчетного уровня a , на котором задается нижнее граничное условие для уравнения (2.2.1), принимается равной половине высоты донных форм k_s , рассчитываемой по методу определения размера шероховатости дна, изложенному в работе [110]:

$$k_s = \begin{cases} 150 f_{cs} d_{50}, & \Psi \leq 50 \\ 20 f_{cs} d_{50}, & \Psi > 250 \\ (182.5 - 0.652\Psi) f_{cs} d_{50}, & 50 < \Psi \leq 250 \\ 20 d_{silt}, & d_{50} < d_{silt} \end{cases} \quad (2.2.9)$$

где f_{cs} – эмпирический множитель, применяемый только для крупных донных частиц (размер более 500 мкм), Ψ – параметр мобильности, d_{silt} – отсчетный диаметр частиц ила, принимаемый равным 32 мкм. Параметры f_{cs} и Ψ определяются по следующим формулам:

$$f_{cs} = \begin{cases} \left(\frac{0.25d_{gravel}}{d_{50}} \right)^{1.5}, & d_{50} > 0.25d_{gravel} \\ 1, & d_{50} \leq 0.25d_{gravel} \end{cases} \quad (2.2.10)$$

$$\Psi = \frac{u_{wc}^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{50}} \quad (2.2.11)$$

где d_{gravel} – отсчетный диаметр частиц гравия, принимаемый равным 2000 мкм, $u_{wc}^2 = U_w^2 + u_c^2$, U_w – максимальная придонная волновая орбитальная скорость, м/с, u_c – придонная скорость течения, м/с. Минимальное значение высоты отсчетного уровня a принимается равным 1 см [111].

Скорость гравитационного опускания $W_{s,0}$ отдельной частицы рассчитывается в зависимости от размера частицы по следующим формулам. Для частиц с диаметрами, меньшими 100 мкм, используется соотношение для скорости оседания в диапазоне Стокса:

$$W_{s,0} = \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{50}^2}{18\nu} \quad (2.2.12)$$

для частиц с диаметрами от 100 до 1000 мкм – формула [109, 122]:

$$W_{s,0} = 10 \frac{\nu}{d_{50}} \left\{ \left[1 + \frac{0.01 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{50}^3}{\nu^2} \right]^{0.5} - 1 \right\}, \quad (2.2.13)$$

для частиц больше 1000 мкм [109, 106]:

$$W_{s,0} = 1.1 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{50}} \quad (2.2.14)$$

Помимо непосредственного вычисления скорости оседания частиц как функции их размера по формулам (2.2.12) – (2.2.14), в модели дополнительно

вводятся поправочные коэффициенты на затрудненное оседание (φ_{hs}) и возможность протекания процесса флокуляции (φ_{floc}). В результате, скорость оседания W_s становится переменной величиной, как и сама концентрация частиц и соленость, и заново рассчитывается в модели на каждом временном шаге. Сказанное можно выразить соотношением [111]:

$$W_s = \varphi_{floc} \varphi_{hs} W_{s,0} \quad (2.2.15)$$

Флокуляция в природе наблюдается, как правило, лишь у достаточно мелких частиц, поэтому в модели она учитывается лишь для частиц размером менее $d_{sand}=62$ мкм. Для взвешенных частиц больше 62 мкм ($d_{50} \geq d_{sand}$) эффект флокуляции не учитывается ($\varphi_{floc}=1$). Для взвешенных частиц размером $d_{50} < d_{sand}$ и при солености окружающей воды S выше 5 ‰ в модели учитывается эффект флокуляции посредством расчета поправки φ_{floc} по соотношению [111]:

$$\varphi_{floc} = \left[4 + \lg \left(\frac{2C}{C_{gel}} \right) \right]^\beta, \quad (2.2.16)$$

$$\varphi_{floc} = \begin{cases} 1, & \varphi_{floc} < 1 \\ 10, & \varphi_{floc} > 10 \end{cases}$$

где C – объемная концентрация взвеси с диаметром частиц менее 62 мкм, $\beta = \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} - 1 \right)$ – эмпирический коэффициент, $0 \leq \beta \leq 3$, C_{gel} – гелевая объемная концентрация (промежуточная концентрация между концентрацией в случае затрудненного опускания частиц у дна и концентрацией консолидированных донных осадков):

$$C_{gel} = \left(\frac{d_{50}}{d_{sand}} \right)^\alpha C_{gel,s}, \quad C_{gel} \geq 0.05 \quad (2.2.17)$$

где α – эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1, $C_{gel,s}$ – максимальная объемная концентрация частиц песка в донных песчаных осадках (доля объема частиц песка в общем объеме), $C_{gel,s} = (1-P) = 0.65$, где P – пористость песчаных донных осадков (примерно 0.35 для чистых песков).

При солености $S < 5$ ‰ эффект флокуляции для частиц менее 62 мкм также не учитывается ($\varphi_{floc}=1$). 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 соленой воде в модели принимается равным 0.2 мм/с [111].

Коэффициент φ_{hs} , учитывающий эффект затрудненного опускания вследствие замедляющего влияния соседних частиц, рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{hs} = (1 - C_{total})^n, \quad (2.2.18)$$

где C_{total} – суммарная объемная концентрация всех фракций взвешенных частиц, $\text{м}^3/\text{м}^3$, n – эмпирический параметр, принимаемый равным 5 [83]. Поправка φ_{hs} для скорости оседания взвешенного вещества неявно учитывает и влияние концентрации взвеси на вязкость жидкости [111].

Для определения критического значения придонного напряжения чаще всего используется кривая Шилдса [94]. Тем не менее, более поздние исследования показали, что использование кривой Шилдса для донных осадков с мелкозернистой фракцией частиц может привести к неточным оценкам критического напряжения τ_{cr} [73, 110]. Поэтому в настоящей работе для определения безразмерного критического придонного напряжения θ_{cr} , при превышении которого начинается движение частиц, используются следующие соотношения [73]:

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.115(D_*)^{-0.5}, & D_* < 4 \\ 0.14(D_*)^{-0.64}, & 4 \leq D_* < 10 \end{cases}. \quad (2.2.19)$$

Зная критическое значение параметра Шилдса θ_{cr} , можно определить исходное критического придонное сдвиговое напряжение $\tau_{cr,0}$:

$$\tau_{cr,0} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho_w) g d_{50} \quad (2.2.20)$$

Дальнейшее уточнение значения критического напряжения выполняется в модели посредством введения поправок на когезию (φ_{coh}), уплотненность (φ_{pack}) и наличие органического материала (φ_{bio}). Окончательно критическое напряжение рассчитывается по формуле [110]:

$$\tau_{cr} = \varphi_{coh} \varphi_{pack} \varphi_{bio} \tau_{cr,0} \quad (2.2.21)$$

В настоящей работе во всех выполненных модельных расчетах поправка ϕ_{bio} принята равной 1 из-за отсутствия данных о содержании органического материала на дне. Поправка на когезию ϕ_{coh} рассчитывается по следующим соотношениям в зависимости от среднего диаметра частиц d_{50} [110]:

$$\phi_{coh} = \begin{cases} (1 + p_{clay})^3, & d_{50} \geq d_{sand} \\ \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^\gamma, & d_{50} < d_{sand} \end{cases} \quad (2.2.22)$$

где γ – эмпирический коэффициент, $1 \leq \gamma \leq 2$.

Поправка на уплотненность ϕ_{pack} , вводимая лишь для частиц диаметром менее 62 мкм, рассчитывается по формуле:

$$\phi_{pack} = C_{gel} / C_{gel,s} \quad (2.2.23)$$

Для частиц диаметром более 62 мкм поправка ϕ_{pack} принимается равной 1.

В модели также реализован учет влияния плотности взвешенных частиц на плотностную стратификацию посредством вычисления плотности не только как функции температуры, солёности и давления, но и концентрации взвеси на каждом временном шаге. Такая методика расчета плотности смеси допустима в силу того, что жидкость с взвешенным в ней большим количеством мелких частиц можно рассматривать как однородную среду при изучении явлений с характерными масштабами большими, чем размер самих частиц [4]. Учет плотности взвешенных частиц важен в двух аспектах. Во-первых, это влияет на картину течения посредством изменения градиента плотности. Во-вторых, изменение в вертикальной плотностной стратификации из-за наличия в воде взвеси влияет и на вертикальное турбулентное перемешивание. Частицы донных осадков, как правило, имеют плотность выше плотности воды. Поэтому адвекция взвеси в поверхностные слои из других районов приводит к ослаблению вертикальной плотностной устойчивости, что усиливает вертикальный турбулентный обмен. С другой стороны, в месте, где происходит взмучивание частиц со дна, в первом приближении образуется профиль концентрации Роуза, как было отмечено ранее в первой главе. В результате, с глубиной концентрация частиц растет, следовательно, усиливается и плотностная устойчивость столба жидкости, затрудняя турбулентный обмен. Наконец, само присутствие в воде взвешенных частиц означает, что некоторая доля турбулентной энергии была

затрачена на их подъем со дна и удержание во взвешенном состоянии, что также ослабляет вертикальный турбулентный обмен по сравнению со случаем без учета взвеси. Таким образом, в общем случае учет влияния плотности взвеси на плотностную стратификацию необходим и должен быть включен в модель.

2.3 Расчет придонного сдвигового напряжения

Максимальный за волновой цикл модуль суммарного придонного сдвигового напряжения τ_b , обусловленного течениями и волнением, в каждой точке рассчитывается в модели согласно рекомендациям [99]:

$$\tau_b = \sqrt{(\tau_m + \tau_w |\cos \lambda|)^2 + (\tau_w |\sin \lambda|)^2} \quad (2.3.1)$$

где τ_m – средний за волновой цикл модуль придонного напряжения, Н/м², τ_w – придонное сдвиговое напряжение за счет волнения, Н/м², λ – угол между направлением течения и волнения, рад. Величина τ_m в формуле (2.3.1) рассчитывается по так называемой эмпирической формуле DATA2, полученной по более чем сотне натурных и лабораторных измерений среднего придонного напряжения [98]:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (2.3.2)$$

где τ_c – придонное сдвиговое напряжение, создаваемое течением, Н/м². Оно определяется в процессе расчета характеристик придонного пограничного слоя в модели циркуляции.

Придонное сдвиговое напряжение за счет волнения τ_w рассчитывается по формуле:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_w f_w U_w^2. \quad (2.3.3)$$

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

$$f_w = \max\{f_{wr}, f_{ws}\}, \quad f_{wr} = 0.237 r^{-0.52}, \quad f_{ws} = B \text{Re}_w^{-N}, \quad (2.3.4)$$

где $r = A/k_s$ – относительная шероховатость; $Re_w = \frac{U_w A}{\nu}$ – число Рейнольдса; $A = \frac{U_w T_m}{2\pi}$ – полуорбитальное смещение у дна, м; ν – кинематическая вязкость воды, m^2/c ; k_s – размер шероховатости Никурадзе, м; $B = 2$ и $N = 0.5$ при $Re_w \leq 5 \times 10^5$, $B = 0.0521$ и $N = 0.187$ при $Re_w > 5 \times 10^5$.

Приведенная выше методика расчета суммарного придонного сдвигового напряжения трения обладает тем достоинством, что по формулам (2.3.1)–(2.3.4) оно рассчитывается явно, без использования каких-либо итерационных процедур, используемых в других методах расчета (см., например, [50]). Это заметно сокращает время интегрирования модели. Аналогичным образом рассчитывалось суммарное придонное напряжение в работе [80], где успешно был воспроизведен процесс взмучивания в Ваттовом море вдоль юго-восточного побережья Северного моря, а также в работе [28] при моделировании переноса взвешенного вещества у побережья Калифорнии.

2.4 Расчет параметров ветрового волнения

Для расчета параметров ветрового волнения в настоящей работе использовалась модель ветрового волнения SWAN, специально разработанная для описания волн в мелководных прибрежных районах со сложной конфигурацией береговой черты [33, 85]. Использование модели SWAN позволяет при воспроизведении ветрового волнения учитывать воздействие ветра, обрушение волн на мелководье, рефракцию волн, наличие течения, придонное трение, образование барашков и нелинейное волновое взаимодействие (квадрупольное и трехволновое взаимодействие). 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 по SWAN выполнялись на той же криволинейной квазиортогональной сетке в сферической системе координат, что использовалась в модели циркуляции. Модель SWAN для всех расчетов работала в нестационарном режиме. В расчетах используется неявная численная схема BSBT, позволяющая для нестационарного

режима задавать крупные шаги по времени для сокращения общего времени счета. Для выхода из режима итераций, который реализуется на каждом временном шаге, используются следующие условия [33, 85]: 1) различие между локальными высотами значительных волн для двух последовательных итераций не превышает 2 % или не превышает 2 % от средней по акватории высоты значительных волн, 2) различие между локальными средними волновыми периодами для двух последовательных итераций не превышает 2 % или не превышает 2 % от осредненного по акватории среднего волнового периода, 3) условия 1 и 2 выполнены в более чем 98 % расчетных точек.

С целью установить чувствительность модели к заданию различных физических процессов, была проведена серия тестовых расчетов. Особое внимание было уделено 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 [33] отмечается, что включение в расчеты волновых триад практически не повлияло на высоту значительных волн и пиковую частоту. В [121], 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 [87] 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 с учетом и без учета триад показали, что различие в рассчитанных характеристиках волн, как правило, невелики. Лишь изредка в нескольких мелководных районах с глубинами 0.2–0.4 м в случае учета триад отмечался резкий рост высот волн, который, по-видимому, вызывался локальной неустойчивостью численного решения. В случае отсутствия учета триад этого не происходило. Поэтому во всех последующих расчетах, результаты которых приведены в разделах 3 и 4, эффект волновых триад не учитывался.

В качестве выходных данных модели SWAN для дальнейшего использования 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.

3 Результаты моделирования взмучивания донных осадков в Невской губе

Ранее уже выполнялись работы по моделированию переноса примеси в Невской губе [57, 74, 9, 3, 10] или исследования по трансформации береговой черты Невской губы вследствие эрозии [89]. Вместе с тем, моделирования взмучивания минеральных частиц со дна и их переноса для Невской губы до настоящего времени не проводилось.

3.1 Физико-географическое описание Невской губы

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования процесса взмучивания донных и переноса взвешенных осадков на примере Невской губы (Рисунок 3.1.1). Ниже следует краткое описание основных физико-географических и гидрологических свойств данной акватории как основного объекта исследования.



Рисунок 3.1.1 – Положение исследуемой акватории в восточной части Финского залива

Невская губа расположена в восточной части Финского залива. С востока ограничена баром реки Невы. Западной границей ранее считалась линия Лисий Нос—Кронштадт—Ломоносов. Длина губы с востока на запад составляет около 21 км,

максимальная ширина около 15 км. Площадь водного зеркала 329 км² [7]. После постройки Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) за западную границу Невской губы принимается линия дамбы и остров Котлин, при этом площадь водного зеркала увеличилась до 380 км². Невская губа является мелководной акваторией, средняя естественная глубина не превышает 3–5 м (Рисунок 3.1.2).

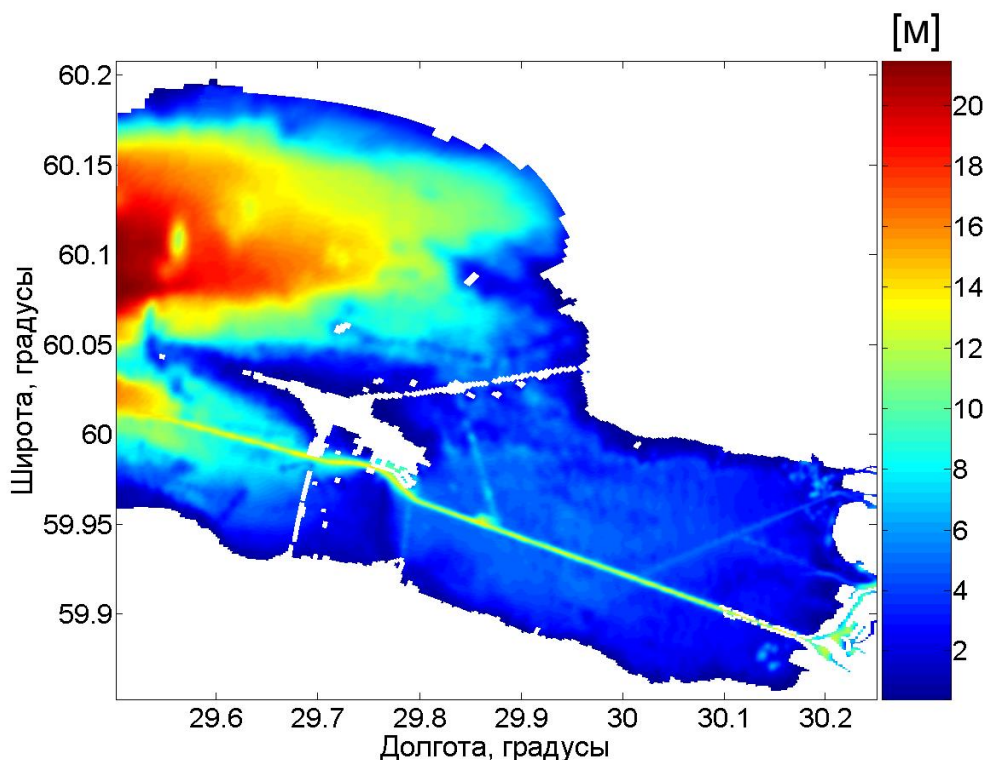


Рисунок 3.1.2 – Карта глубин в Невской губе и в восточной части Финского залива

С востока на запад через Невскую губу проходит Морской канал от устья Большой Невы до острова Котлин. Его глубина варьируется на всем протяжении в небольшом диапазоне, в среднем составляя 12 м, при этом ширина канала составляет около 100 м. Наиболее глубоководная естественная часть Невской губы, называемая Невским седиментационным бассейном, располагается в западной ее части и ограничена пятиметровой изобатой.

Особенностью Невской губы является высокий водообмен (0.015 года) и гомотермия. Воды Невской губы практически пресные с соленостью, как правило, менее 1 ‰, что обусловлено пресноводным стоком реки Невы. Вместе с тем, при проникновении в Невскую губу вдоль Морского канала осолоненных вод из

Финского залива в периоды сильных ветров западного направления и штормовых нагонов может формироваться двухслойная вертикальная структура. Но даже в этом случае соленость нижележащего слоя в западной части Морского канала обычно не превышает 4 ‰ [18, 8].

Колебания уровня в Невской губе контролируются главным образом ветровым воздействием, и хотя приливы и имеют место, их величина крайне мала, в среднем за год составляя около 10 см. Наибольшее же влияние оказывают сгонно-нагонные ветра. Дополнительно следует упомянуть штормовые нагоны, формирующиеся, когда циклон, проходящий над Балтийским морем или Финским заливом, дополнительно к ветровому нагону может генерировать подъем уровня вследствие разности атмосферного давления (так называемый «эффект обратного барометра»). Этот подъем уровня воды распространяется в виде длинной волны. При этом если скорости циклона и волны равны, наступает резонанс, и высота волны увеличивается. Подход такой волны, сопровождаемый нагонным ветром, к Невской губе, является основной причиной невских наводнений.

Система течений в Невской губе формируется, главным образом, стоком реки Невы [17]. Однако помимо этого на картину течений влияют также сейши, приливы, сгонно-нагонные колебания и дрейфовые течения [7].

Ветровое волнение в Невской губе создается преимущественно локальным ветровым воздействием в силу наличия таких объектов как остров Котлин и КЗС, препятствующих свободному прохождению волн, приходящих с запада из Финского залива, в губу. Из-за локального характера волнения и особенностей водоема картина волнение довольно быстро изменяется, подстраиваясь под колебания поля ветра. При прекращении ветра волнение исчезает спустя 1–2 часа. Измерения волнения у оголовков дамб Морского канала показывает, что наибольшей климатической повторяемостью обладают волны высотой 5–25 см [7]. Более подробный анализ позволяют сделать результаты численного моделирования ветрового волнения, показывающие, что при слабых ветрах около 3 м/с высота значительных волн в Невской губе не превосходит 15 см, при скоростях ветра 7–11 м/с — составляет 40–70 см, а при штормовых ветрах (21 м/с) высота волн может достигать 1.0–1.2 м. При этом на саму величину высот волн и их местоположение в акватории, разумеется, оказывает большое влияние направление ветра [61].

Замерзание Невской губы начинается обычно в середине – второй половине ноября, и к концу декабря губа полностью покрывается льдом. Лед держится до середины весны, и в двадцатых числах апреля начинается его вскрытие. Полностью очищение ото льда происходит к концу апреля [7].

Донные осадки в Невской губе составляют различные фракции, от пелитов до валунов. В общем случае, пространственное распределение частиц различных фракций в донных осадках зависит от гидрологических условий данного конкретного района. Частицы мелкозернистых фракций встречаются, как правило, в районах с относительно низким энергетическим режимом потока, в то время как более крупные частицы могут находиться на дне и при высоких скоростях потока, вызываемых сильным течением или обрушением волн. Как правило, с удалением от источника взвеси на дне фракционный состав донных осадков меняется: чем дальше от источника, тем более мелкие частицы встречаются все чаще и тем более однороден состав самих осадков. Прибрежные районы Невской губы представлены песками различных фракций – от крупно-среднезернистых вблизи берега до мелко-тонкозернистых на глубинах 1.5–2.0 м [7]. Осадконакопление в акватории происходит главным образом в Невском седиментационном бассейне и в районах донных карьеров. Помимо источника осадков со дна, взвесь поступает также и со стоком Невы, однако этот материал оседает главным образом за пределами Невской губы.

3.2 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 Невской губе и сравнить его с какими-то натурными наблюдениями крайне трудно вследствие поступления взвеси от искусственных источников, интенсивность которых во много раз превышает естественное взмучивание. В этой связи важно было корректно выбрать период времени, в течение которого техногенное влияние на концентрацию взвеси в Невской губе было бы минимальным.

Гидротехнические работы в акватории Невской губы, связанные с выемкой грунта и намывом новых территорий, начались еще в 1976 году и с различной интенсивностью продолжались вплоть до начала 90-х. Этот период характеризуется

повышенными концентрациями взвеси в Невской губе [15]. Период с начала 90-х по 2004 год характеризовался постепенным улучшением состояния вод акватории. К 1998 году концентрация взвеси уменьшилась в 3–4 раза, а к 2000 году состояние вод Невской губы вернулось к своему естественному состоянию [14]. В 2005 году в Невской губе также проводились гидротехнические и дноуглубительные работы [16]. Активные работы по проекту «Морской фасад Санкт-Петербурга», начатые в 2006 году 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 от искусственных источников.

Таким образом, наиболее подходящим для изучения естественного взмучивания в Невской губе является период с 2000 по 2004 год. Но даже в этот период в течение полутора лет (с ноября 2001 года по май 2003 года) проводились работы по реконструкции Константиновского дворца в поселке Стрельна, расположенном на побережье Невской губы к юго-западу от Санкт-Петербурга. Учитывая сказанное, для исследования естественного взмучивания был выбран 2004 год, в течение которого по доступной информации интенсивных гидротехнических работ в Невской губе не проводилось.

В настоящей работе используется трехмерная модель Невской губы [88], основанная на модели общей циркуляции океана Принстонского университета [30]. В вертикальном направлении модель имеет 7 равномерных σ -уровней, при этом минимальная глубина составляет 20 см. В горизонтальной плоскости расчетная сетка состоит из 350x182 узлов с минимальным разрешением 60–70 м и максимальным разрешением около 1 км. На Рисунке 3.2.1 показана расчетная область и линии горизонтальной квазиортогональной сетки модели. Данная расчетная область и горизонтальная сетка использовались и для модели SWAN.

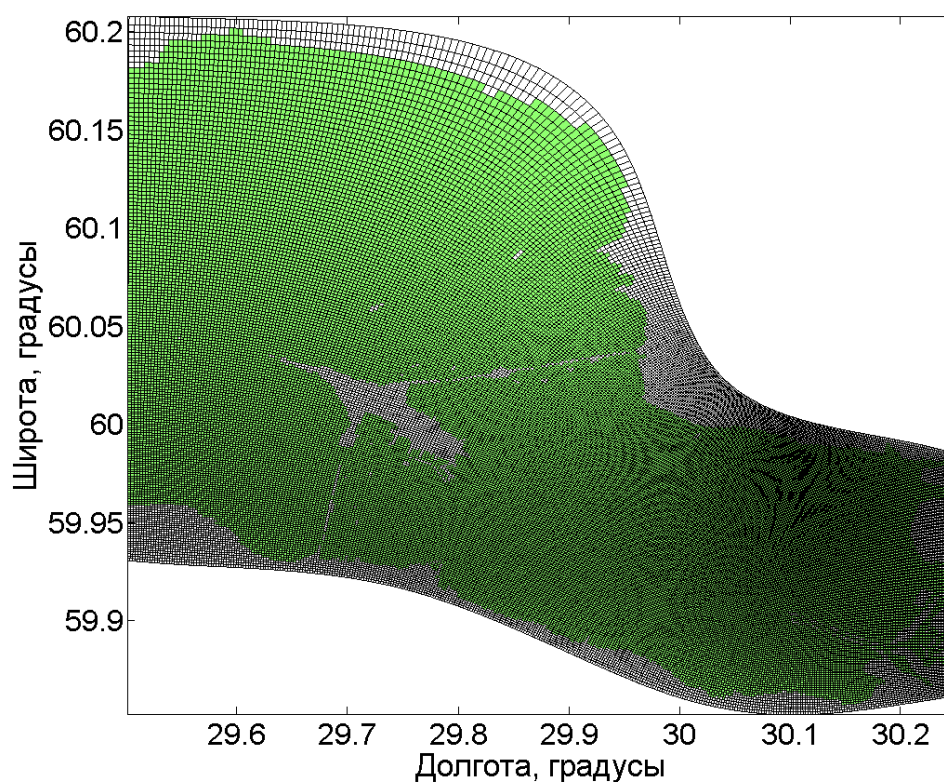


Рисунок 3.2.1 – Расчетная область и линии горизонтальной квазиортогональной сетки модели

В расчетах в циркуляционной модели 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 Орланского для скорости течения [78]. 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. У дна на нижней границе ставилось условие равенства нулю вертикальной компоненты скорости и потоков тепла и соли, а напряжение трения рассчитывалось как функция скорости течения на нижнем расчетном уровне при логарифмическом профиле скорости. На верхней границе расчет атмосферного воздействия выполнялся в соответствии с рекомендациями [79], при этом учитывался суточный ход коротковолновой радиации. Напряжение трения ветра рассчитывалось по квадратичному закону. Суммарный поток тепла на границе вода–атмосфера рассчитывался как функция температуры и влажности воздуха в

приводном слое, температуры воды, поглощенной коротковолновой радиации, зависящей от времени и географической широты места, облачности и альбедо водной поверхности. Поток соли на верхней границе являлся функцией разности осадков и испарения и поверхностной солености.

Для концентрации взвеси на твердых боковых границах ставилось условие отсутствия потока взвеси, на жидких боковых границах ставилось условие излучения. На верхней границе поток взвеси полагался равным нулю. На нижней границе поток взвеси рассчитывался согласно соотношениям, приведенным в разделе 2.2. Во всех расчетах на начальный момент времени полагалась нулевая концентрация взвеси во всей области.

В расчетах использовалась фактическая метеорологическая информация по станции Кронштадт [11, 12]. Для расчета за 2004 год использовались фактические данные по расходу и температуре воды реки Невы [1]. Для всех остальных расчетов использовались климатические данные по расходу и температуре воды Невы [7].

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 волнение полагалось равным нулю, а для выходящего волнения задавалось условие излучения. В начальный момент времени полагалось отсутствие волнения в акватории. Расчетная область и сетка – те же, что использовались в модели циркуляции.

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, используемые для калибровки и валидации модели взмучивания.

3.3 Оценки интенсивности ветрового волнения в Невской губе

На Рисунках. 3.3.1 и 3.3.2 представлено пространственное распределение модельной высоты значительных ветровых волн для различных метеорологических ситуаций в расчетный период в 2004 году.

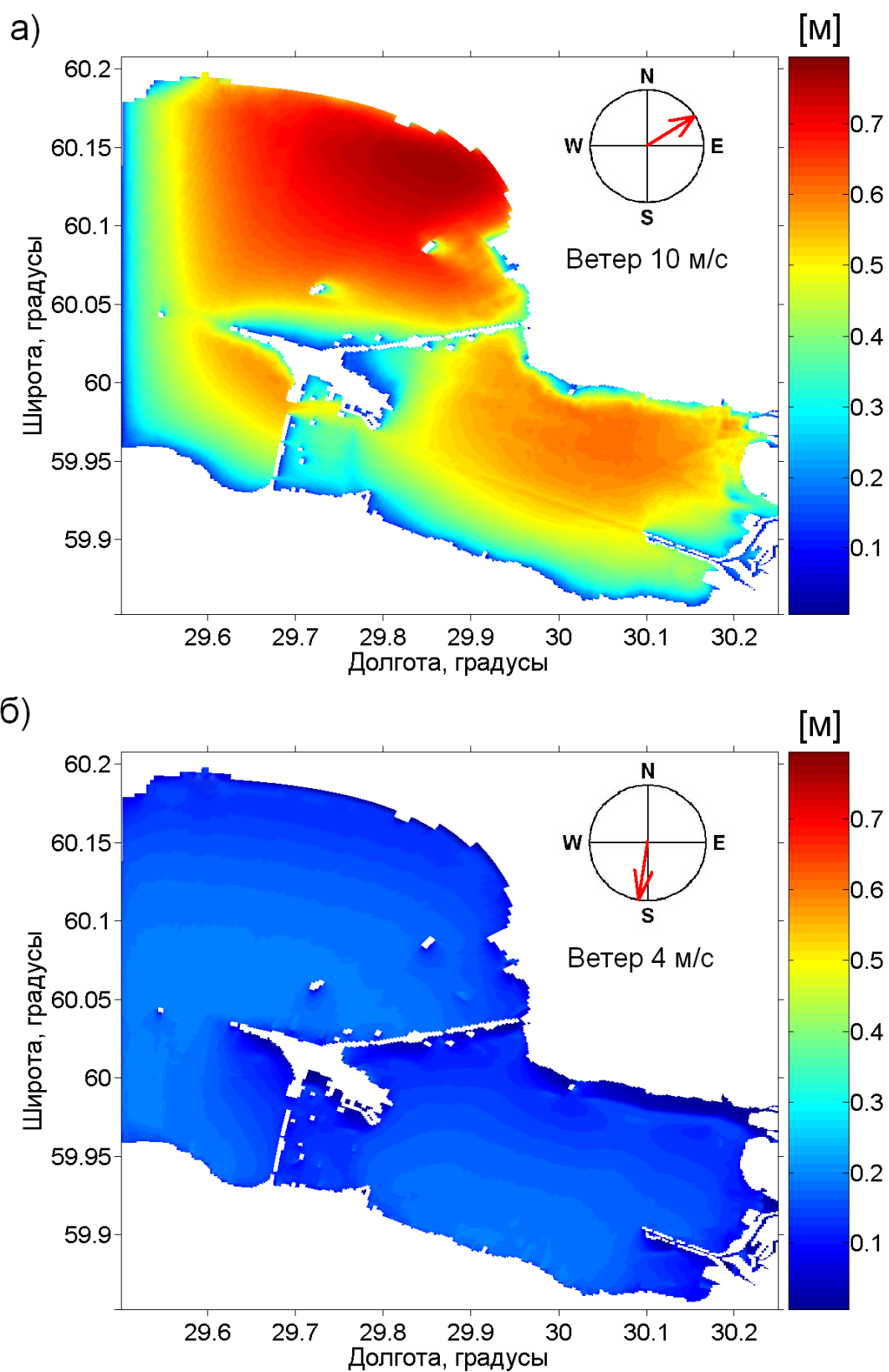


Рисунок 3.3.1 – Пространственное распределение рассчитанной высоты значительных ветровых волн в Невской губе для различных метеорологических ситуаций:

2004-05-22 в 12:00 (а) и 2004-06-09 в 07:00 (б)

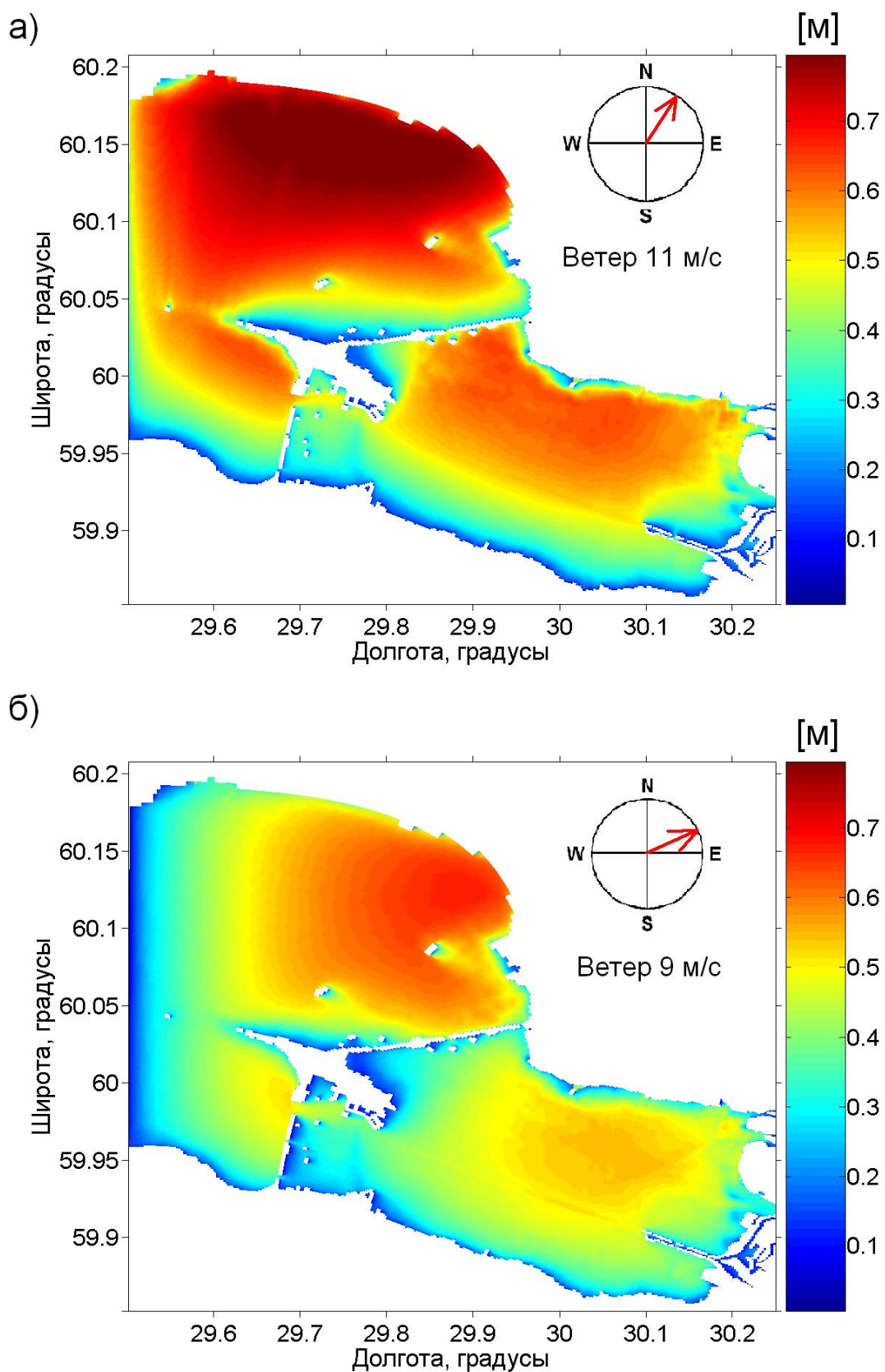


Рисунок 3.3.2 – Пространственное распределение рассчитанной высоты значительных ветровых волн в Невской губе для различных метеорологических ситуаций:

2004-06-14 в 12:00 (а) и 2004-06-15 в 10:00 (б)

Как видно из представленных рисунков, поля рассчитанных высот 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. Вдоль самой береговой черты наблюдается обрушение волн, вследствие чего высота волн падает. При ветрах западных направлений волны проходят через судопропускное сооружение С1 КЗС и распространяются дальше на восток по Невской губе.

Одним из очевидных достоинств модели SWAN является автоматический учет в ней длины разгона волн, который не учитывался в выполненных ранее предварительных численных экспериментах в работе [6], где использовалась простая параметрическая модель ветрового волнения. Это приводило к переоценке высот волн, так как использовались эмпирические зависимости для уже развитого волнения. Кроме того, так как направление волнения не учитывалось, то не наблюдались участки волновой тени и рост высоты волн у подветренного берега акватории. В результате, вне зависимости от направления ветра взмучивание отмечалось вдоль всего побережья Невской губы, что на практике маловероятно. Напротив, судя по Рисункам 3.3.1 и 3.3.2, высоты волн малы вдоль наветренной стороны акватории.

Большую часть времени в расчетный период модельные высоты волн лежали в диапазоне от 10 до 25 см при скоростях ветра 1–4 м/с. В этой связи Рисунок 3.3.1б весьма показателен и отражает характерные высоты ветровых волн в Невской губе подавляющее количество времени. При усилении юго-юго-западного ветра до 11 м/с, что наблюдалось 14-го июня (Рисунок 3.3.2а), вычисленная высота значительных волн также увеличивается, достигая величины более 80 см вдоль северной границы области в районе города Зеленогорск и поселка Репино. При этом модельная высота волн в самой Невской губе к востоку от КЗС составляет 50–70 см с максимумом вдоль северного берега. Из рисунков также видно, что максимальные высоты волн в акватории вызываются сильными ветрами западных и юго-западных направлений, что весьма типично для данного района в силу особенностей атмосферной циркуляции.

Что касается пространственного распределение волн в Невской губе, то оно, в силу значительной изолированности акватории, определяется главным образом

направлением ветра. К западу же от дамбы в восточной части Финского залива волнение в действительности определяется не только локальным ветровым воздействием, но и приходом волн с запада из Финского залива. К сожалению, последний механизм не реализован в модели в силу отсутствия данных по спектру входящего волнения для задания на западной границе области, вследствие чего принимается, что входящее волнение отсутствует. Поэтому при западных направлениях ветра модель недооценивает высоту волн к западу от КЗС. Это отчетливо видно на Рисунках 3.3.1а и 3.3.2б, когда 22 мая и 15 июня при западных ветрах 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 оказывает влияния из-за наличия КЗС и острова Котлин, препятствующих свободному прохождению ветровых волн из Финского залива в Невскую губу.

Несмотря на отсутствие натурных данных по ветровому волнению в Невской губе за указанный период, можно оценить качество полученных результатов косвенно, сравнив их с наблюдениями, проводившимися в 1959–1962 гг, на основании которых были получены величины повторяемости тех или иных высот волн в Невской губе. В этой связи полученные для большей части расчетного периода модельные высоты волн 10–25 см при ветре 1–4 м/с хорошо согласуются с 77-процентной повторяемостью наблюдавшихся волн высотой 5–25 см у оголовков дамб Морского канала. При этом на волны высотой более 50 см приходилось лишь 3% повторяемости [7]. Наконец, полученные результаты по волнению очень хорошо согласуются с данными, приводимыми в работе [61], в которой также проводилась оценка ветровых волн в Невской губе посредством численного моделирования.

3.4 Расчет придонных напряжений

Придонное сдвиговое напряжение играет ключевую роль в интенсивности процесса взмучивания. Как уже отмечалось в разделе 1, учет ветрового волнения при моделировании взмучивания донных осадков особенно важен в прибрежных мелководных районах, где вклад волнения в большинстве случаев является преобладающим. Тем не менее, нельзя исключать и влияние течения. Особенно это актуально для Невской губы, в которой хоть и нет мощных приливных течений,

которые в других районах Мирового океана могут значительно увеличить придонное напряжение трения, но есть иные механизмы усиления придонного напряжения. Прежде всего, это наличие реки Невы. В большей части Невы от истока до дельты скорость течения составляет 0.5–0.7 м/с при малом расходе и 1.2–1.5 м/с при большом расходе реки, который меняется в течение года. Непосредственно перед впадением реки в Невскую губу она разделяется на несколько рукавов, что уменьшает скорость течения в них. Однако даже при этом течение в устье Малой Невы составляет примерно 0.3–0.4 м/с при малом расходе и 0.6–0.8 м/с при большом расходе, а скорости течения в Большой Неве доходят до 0.4–0.6 м/с при малом расходе и до 1.1–1.2 м/с при большом расходе [7]. Годовой ход расхода Невы таков, что максимальные его значения наблюдаются в период с мая по октябрь, то есть в безледный период. А именно безледный период в общем случае наиболее интересен с точки зрения оценки совместного влияния волнения и течения на интенсивность взмучивания в данном водоеме. Таким образом, в большинстве случаев наблюдаться будут именно высокие скорости течения, характерные для большого расхода.

С целью оценить величины придонных напряжений, создаваемых течением и волнением, а также установить причины взмучивания донных осадков в различных частях Невской губы, были выполнены соответствующие модельные расчеты. На Рисунках 3.4.1–3.4.4 приведено пространственное распределение придонных напряжений: на рисунках а) – придонное напряжение $\tau_{b,cur}$, создаваемое течением; на рисунках б) – придонное напряжение $\tau_{b,w}$, создаваемое волнением; на рисунках в) – суммарное придонное напряжение τ_b , рассчитываемое по соотношениям (2.3.1) – (2.3.4). Наиболее наглядно вклад $\tau_{b,cur}$ и $\tau_{b,w}$ виден при рассмотрении динамики процесса, когда воздействие волнения при переходе сильного ветра в слабый сменяется влиянием течения, и наоборот. Для того чтобы продемонстрировать сказанное, были выбраны наиболее показательные моменты, в которых преобладает та или иная компонента суммарного придонного напряжения либо их вклад практически равнозначный. Последний случай как раз подчеркивает важность учета обоих факторов при воспроизведении взмучивания донных осадков. Специально для удобства сравнения шкалы на всех рисунках сделаны идентичными.

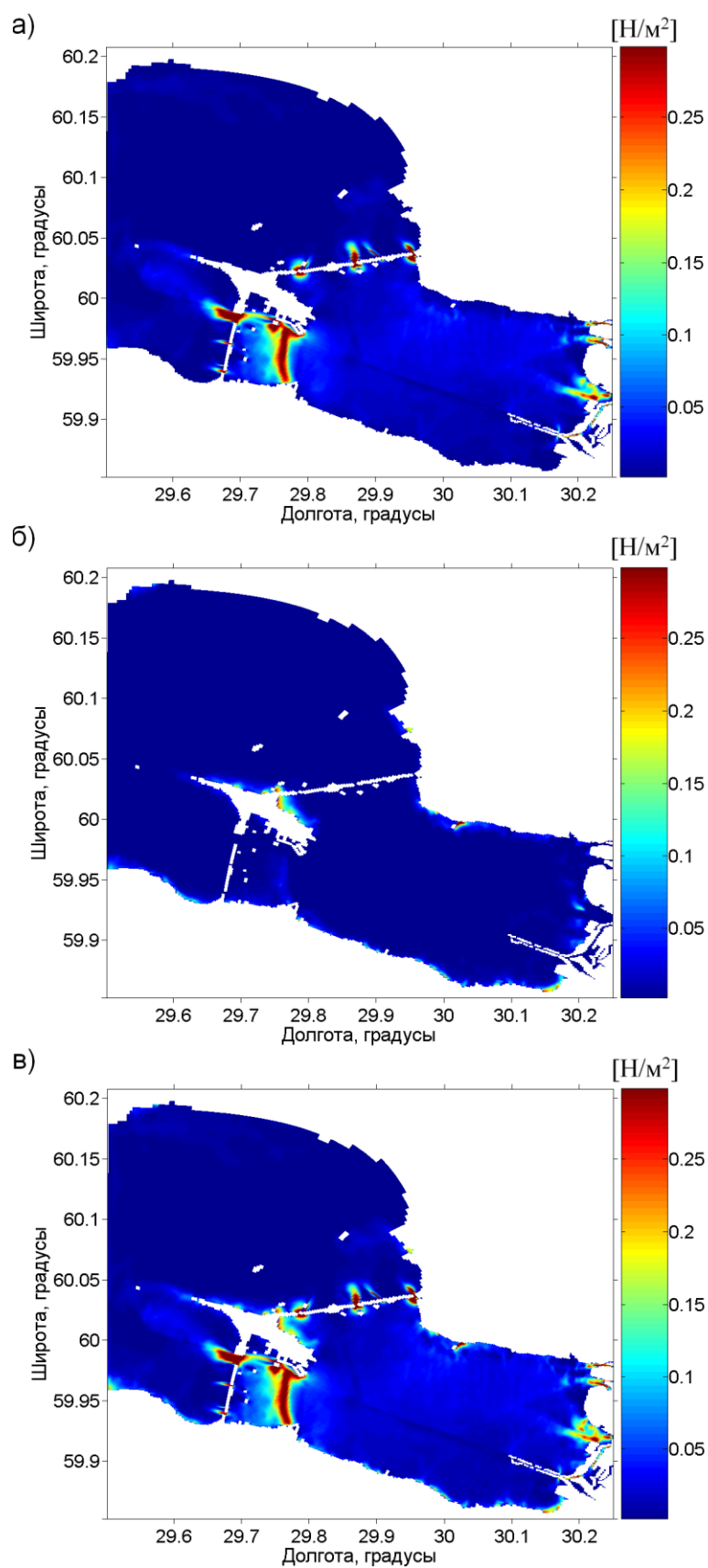


Рисунок 3.4.1 – Рассчитанное придонное напряжение трения 2004-05-24 в 22:00, генерируемое: течением (а), ветровым волнением (б), суммарным воздействием течения и волнения (в)

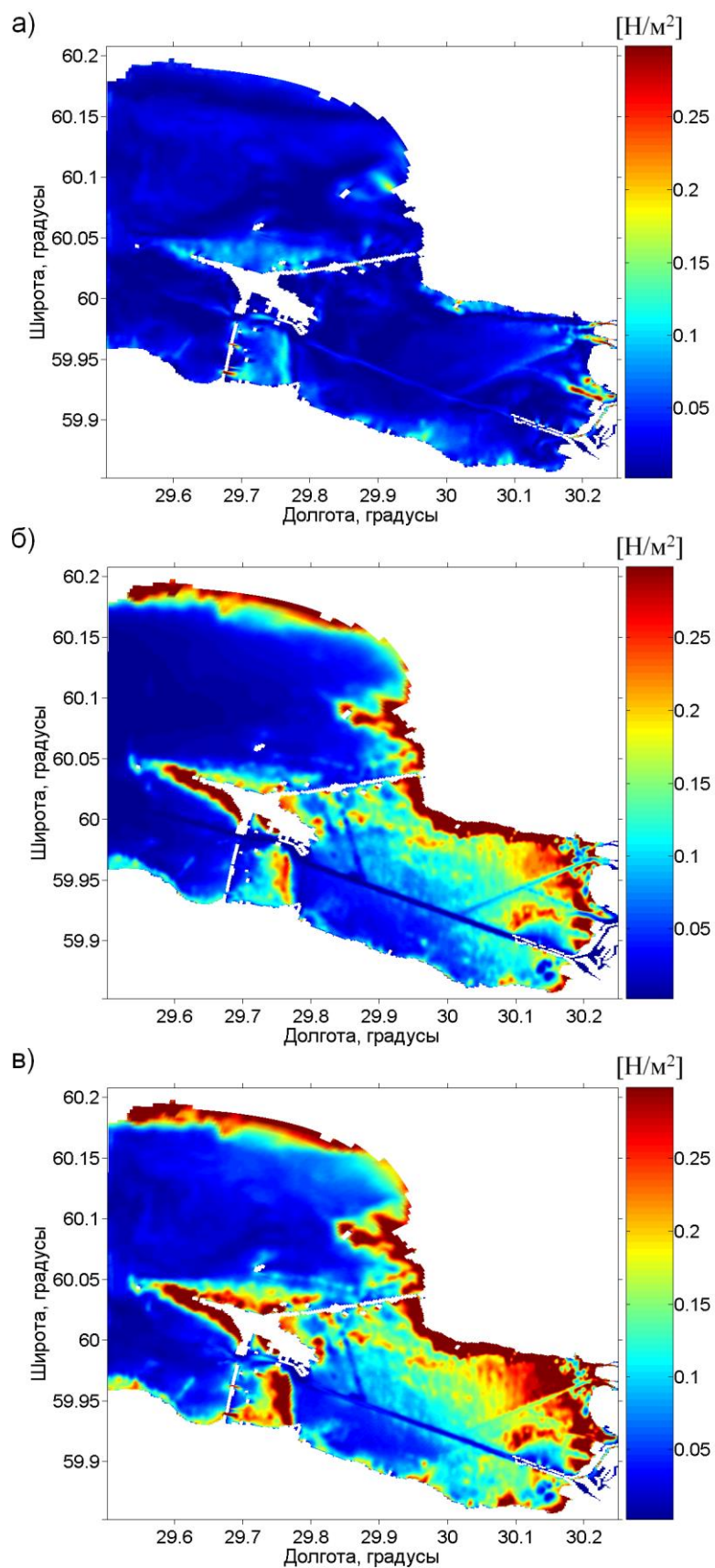


Рисунок 3.4.2 – Рассчитанное придонное напряжение трения 2004-06-14 в 14:00, генерируемое: течением (а), ветровым волнением (б), суммарным воздействием течения и волнения (в)

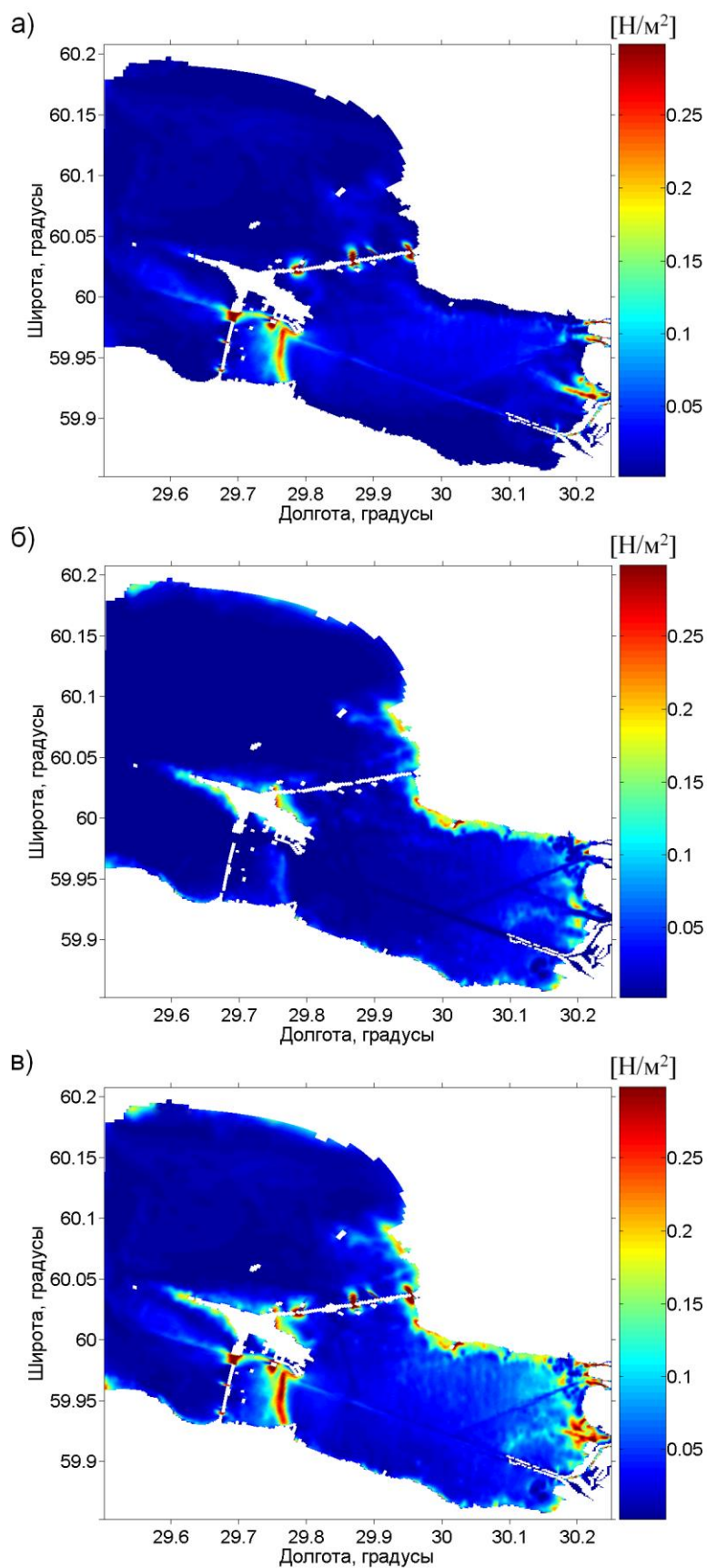


Рисунок 3.4.3 – Рассчитанное придонное напряжение трения 2004-06-01 в 15:00, генерируемое: течением (а), ветровым волнением (б), суммарным воздействием течения и волнения (в)

На Рисунке 3.4.1 показано пространственное распределение придонных напряжений, вызванных только течением, только волнением, а также суммарное придонное напряжение на 22:00 24 мая 2004 года. Из рисунка видно, что на этот момент вклад течения в некоторых районах значительно превосходит вклад волнения, которое было незначительным при скорости ветра всего около 1 м/с и более или менее проявилось лишь у северного побережья Кронштадта с величиной порядка 0.1–0.2 Н/м². В первую же очередь обращает на себя внимание район южнее острова Котлин, называемый Ломоносовской отмелью, где величины придонного напряжения достигали 0.3–0.4 Н/м². При этом в судопропускном сооружении С1 максимальное придонное напряжение составляло около 0.5 Н/м². В северной части дамбы в водопропускных сооружениях придонные напряжения также составили порядка 0.7–0.8 Н/м². Все это вызвано соответствующими колебаниями уровня в вершине Финского залива, когда 23 мая уровень составлял в среднем 20–30 см выше ординара, а вечером 24 мая стал падать и на момент времени 22 часа 24 мая составил 10 см и продолжил падать до 6 см в дальнейшем. Образовавшиеся при этом скорости течения в районе Ломоносовской отмели и в створах дамбы, в некоторых местах превышающие 1 м/с, вкупе с малыми глубинами и приводили к соответствующему росту придонного напряжения. В устье Невы при впадении ее в губу придонные напряжения колебались в пределах 0.2–0.3 Н/м².

Иная картина представлена на Рисунке 3.4.2, отражающем величины придонных напряжений на 14:00 14 июня 2004 года, где уже преобладает вклад ветрового волнения в суммарное придонное напряжение. Скорость юго-юго-западного ветра в этот период составляла порядка 8–10 м/с, что привело к образованию ветровых волн высотой 65–75 см вдоль северной границы области в районе города Зеленогорск и поселка Репино и высотой 50–60 см в самой Невской губе. При этом придонные напряжения, генерируемые волнением, во вдольбереговой полосе от поселка Молодежное до поселка Репино составили 0.3–0.4 Н/м², в районе города Сестрорецк порядка 0.5 Н/м², и вдоль практически всего северного побережья Невской губы от КЗС до Лахты — 0.5–0.6 Н/м². Кроме того, вдоль южного побережья острова Котлин к западу от КЗС величина придонного напряжения $\tau_{b,w}$ также достигала 0.5–0.6 Н/м². На Ломоносовской отмели в силу ее мелководности придонное напряжение $\tau_{b,w}$ составило 0.20–0.25 Н/м², хотя разгон волн там

значительно меньше, чем для открытых районов Невской губы. Придонное напряжение $\tau_{b,cur}$, генерируемое течением, на обозначенный момент времени в сравнении с ветровым воздействием было представлено слабо, хотя и достигало в среднем величины $0.10\text{--}0.15 \text{ Н/м}^2$ в отдельных местах, таких как Ломоносовская отмель, район к северу от побережья острова Котлин, а также в некоторых прибрежных районах. Лишь в устье Невы, как и прежде, придонные напряжения составили $0.2\text{--}0.3 \text{ Н/м}^2$, обусловленные не колебаниями уровня или дрейфовым течением, сильно меняющимися во времени, а стабильным стоком Невы.

Кроме сказанного, необходимо еще добавить одну важную деталь, а именно что указанные максимумы в придонных напряжениях, вызываемых течением и волнением, хоть и имеют один порядок величины для двух различных ситуаций, представленных выше, но пространственное распределение этих двух компонент суммарного придонного напряжения сильно отличается. На Рисунке 3.4.1а придонное напряжение от течения локализовано в относительно небольших по площади районах, в то время как в остальных местах напряжение, как правило, не превышает 0.05 Н/м^2 . Ветровое волнение, напротив, приводит к росту придонного напряжения не только в узкой береговой полосе, хотя там рост наиболее значительный, но и на большой площади Невской губы вплоть до ее центральных районов (см. Рисунок 3.4.2б). При этом в таких районах придонное напряжение достигает $0.15\text{--}0.20 \text{ Н/м}^2$, а в отдельных районах и до 0.25 Н/м^2 .

Распределение придонных напряжений от течения и ветрового волнения, вносящих примерно равнозначный вклад в суммарное напряжение, представлено на Рисунке 3.4.3 на момент времени 15:00 1 июня 2004 года. При этом ни компонента $\tau_{b,w}$, ни $\tau_{b,cur}$ не являются доминирующими, как в предыдущих примерах. Такая картина наиболее характерна вследствие того, что в большинстве случаев для исследуемой акватории типично наличие относительно невысоких скоростей течения и умеренной интенсивности ветрового волнения. За исследуемый период 19 мая – 16 июня не раз наблюдались случаи со схожим совместным влиянием течения и волн, при этом наиболее интенсивный момент был зафиксирован 14 июня в 21:00 (Рисунок 3.4.4).

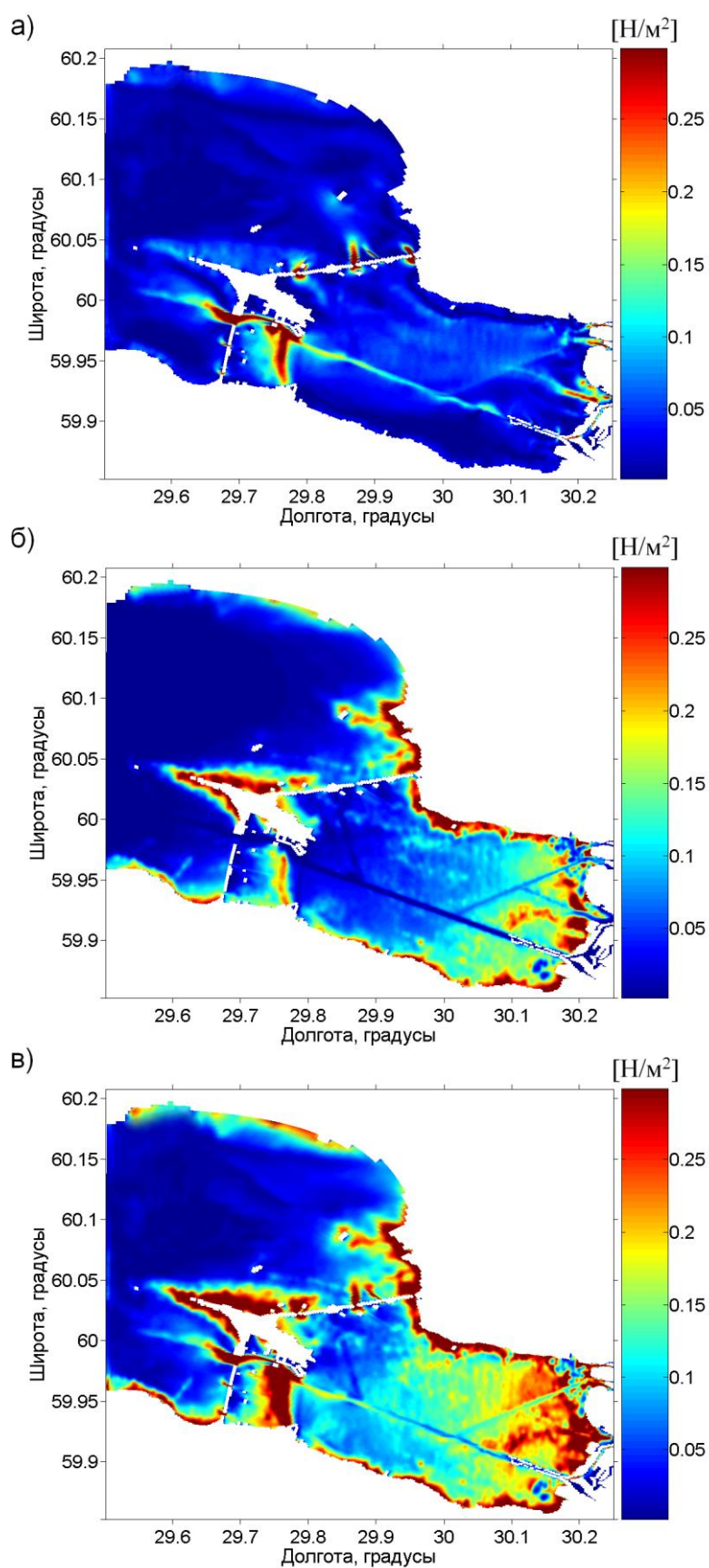


Рисунок 3.4.4 – Рассчитанное придонное напряжение трения 2004-06-14 в 21:00, генерируемое: течением (а), ветровым волнением (б), суммарным воздействием течения и волнения (в)

Значения придонного напряжения составляли $0.5\text{--}0.6 \text{ Н/м}^2$ на Ломоносовской отмели, $0.7\text{--}0.8 \text{ Н/м}^2$ в водопропускных сооружениях КЗС, $0.3\text{--}0.4 \text{ Н/м}^2$ у северного побережья Кронштадта и порядка 0.5 Н/м^2 в районе Сестрорецка. При этом в открытых частях Невской губы придонное напряжение составляло $0.1\text{--}0.2 \text{ Н/м}^2$, постепенно возрастая до $0.3\text{--}0.4 \text{ Н/м}^2$ по направлению от центра Невской губы в восточном направлении. На мелководных песчаных барах реки Невы придонное напряжение достигало 0.5 Н/м^2 , а на вдольбереговой полосе Невской губы $0.2\text{--}0.3 \text{ Н/м}^2$ у южного берега и $0.3\text{--}0.4 \text{ Н/м}^2$ у северного.

Таким образом, можно сделать вывод, что для Невской губы при расчете придонного напряжения, необходимого для определения интенсивности взмучивания донных осадков, следует учитывать не только придонное напряжение, создаваемое ветровым волнением, но и напряжение, генерируемое течением. Максимальный вклад течения проявляется в районе Ломоносовской отмели и створах КЗС в периоды значительных колебаний уровня, когда большие массы воды поступают с запада из Финского залива или выходят из Невской губы. Эти колебания могут быть вызваны как штормовыми нагонами в виде суммарного воздействия длинной волны, приходящей из Финского залива, и ветровым нагоном, так и сейшевыми колебаниями Балтийского моря. Также речной сток Невы генерирует придонные напряжения в ее устье. Тем не менее, 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.

3.5 Эффекты пространственного распределения типов донных осадков

В том случае, если донные осадки не являются однородными в исследуемой акватории, необходимо учитывать их пространственное распределение и различие в свойствах, так как от этого будет зависеть, с какой интенсивностью в том или ином районе будет происходить процесс взмучивания. Целесообразность деления дна на районы с преобладанием какой-либо фракции частиц подтверждается результатами проведенных численных экспериментов, в которых для всей акватории Невской губы и восточной части Финского залива задавалась только одна фракция донных частиц. На Рисунках 3.5.1 и 3.5.2 показано рассчитанное пространственное распределение

концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое воды на 12 часов 22 и 23 мая 2004 года, соответственно. При этом задавалась лишь одна фракция донных частиц на дне: на рисунках а) – только пески, на рисунках б) – только илы. Диаметр частиц песка задавался равным 110 мкм, ила – 9 мкм. Рассчитанные базовые значения скорости оседания (без учета поправок) составили 7.5×10^{-3} м/с и 4.2×10^{-5} м/с для песка и ила, соответственно. Последовательные изображения на 22 и 23 мая выполнены для того, чтобы показать различие в развитии процесса с течением времени.

С метеорологической точки зрения 22 мая в 12 часов наблюдался сильный западно-юго-западный ветер скоростью 7–10 м/с, который в дальнейшем стал стихать и уже к 18 часам 22 мая скорость ветра упала до 3 м/с, оставаясь примерно на этом уровне вплоть до 12 часов 23 мая. Таким образом, в расчетах была воссоздана реальная ситуация, когда при прочих равных условиях на дно, сложенное разными типами осадков в обоих экспериментах, действовал интенсивный внешний форсинг, после чего его воздействие значительно ослаблялось. В результате удастся показать не только разницу в интенсивности взмучивания для разных типов осадков при сильном внешнем воздействии, но и дальнейшее развитие процесса после его прекращения.

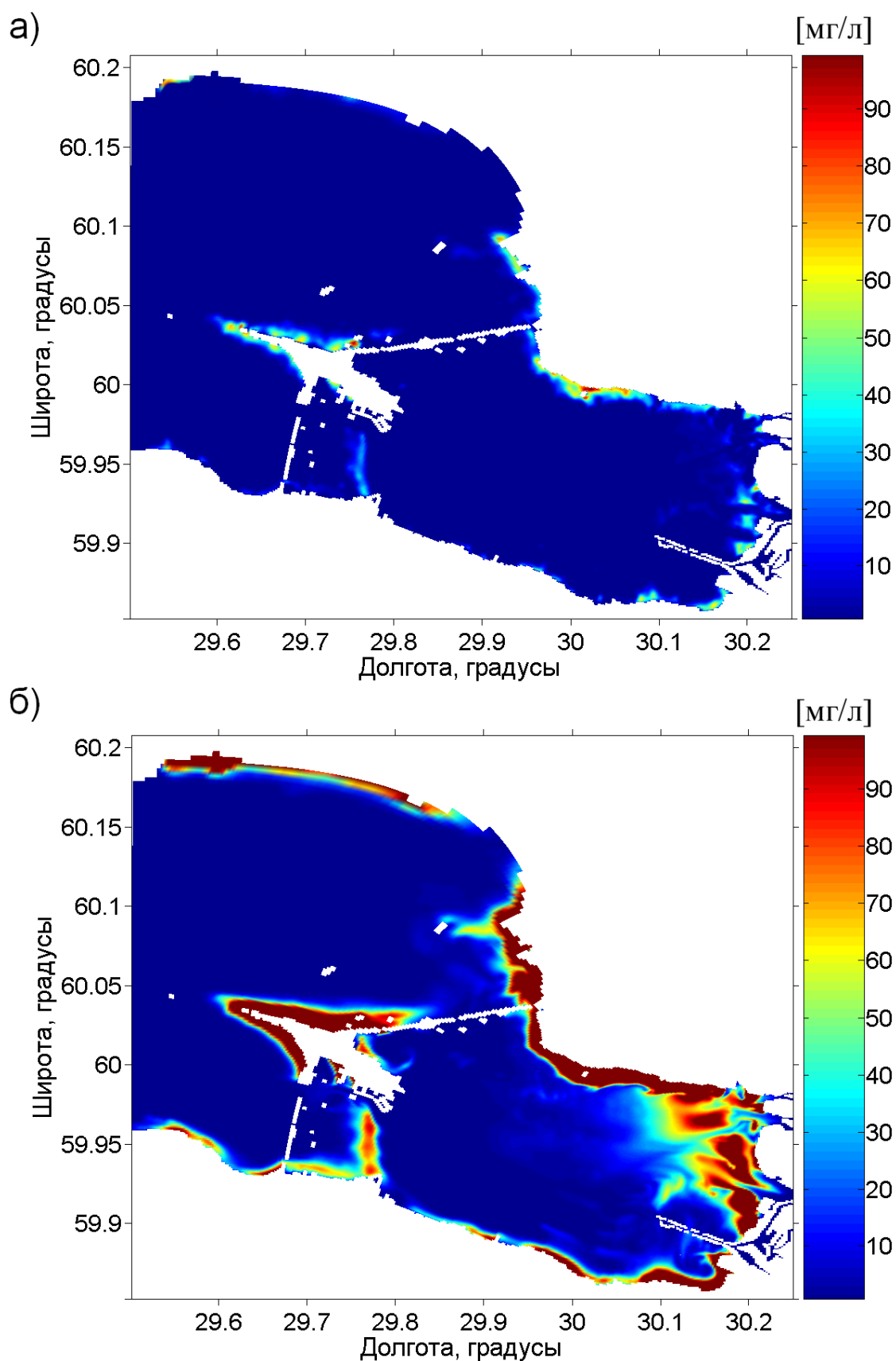


Рисунок 3.5.1 – Пространственное распределение рассчитанной концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое воды на 12 часов 22 мая 2004 года.

Эксперименты с заданием на дне только песков (а) и только илов (б)

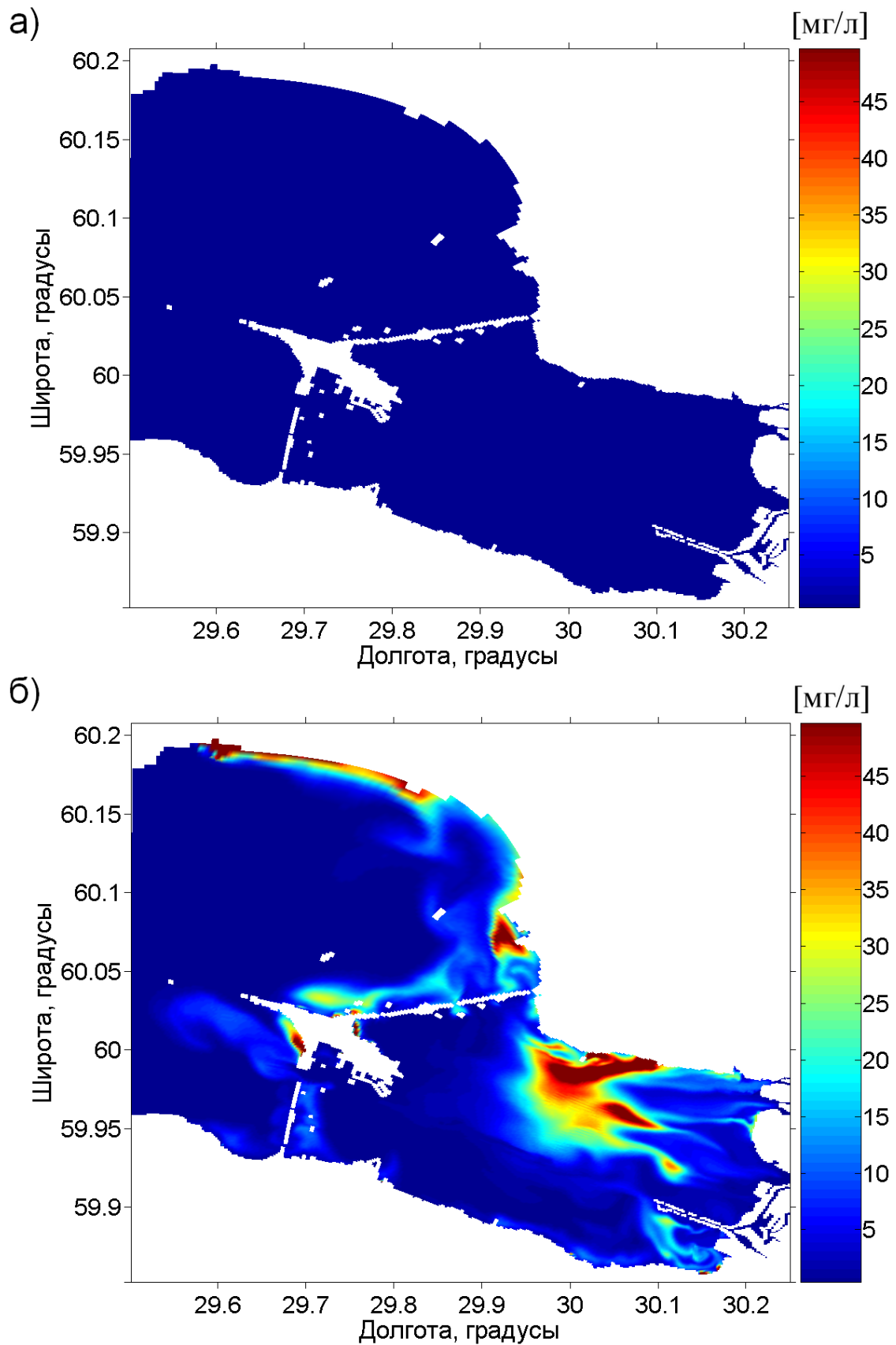


Рисунок 3.5.2 – Пространственное распределение рассчитанной концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое воды на 12 часов 23 мая 2004 года.

Эксперименты с заданием на дне только песков (а) и только илов (б)

Расчеты показали, что в том случае, когда 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. Горизонтальный перенос взмученных частиц песка оказался незначительным, что обусловлено большой скоростью их гравитационного оседания и малыми глубинами в прибрежной зоне. Иными словами, поднявшийся со дна песок сравнительно быстро оседает в тех же районах, где был взмучен, не оставаясь долго во взвешенном состоянии. В приведенном примере, как показано на Рисунке 3.5.1а, максимальные концентрации взвешенных частиц песка в поверхностном слое обнаруживаются вдоль северного берега Невской губы, составляя в среднем 60–70 мг/л и доходя в районе поселка Лисий Нос до 90 мг/л. Также повышенные концентрации взвеси наблюдаются вдоль западного побережья острова Котлин (40–60 мг/л), в районе Сестрорецка (50–60 мг/л) и на мелководьях Ломоносовской отмели (20–30 мг/л) и песчаных баров Невы (40–50 мг/л). При этом уже спустя сутки после интенсивного взмучивания концентрация взвеси в поверхностном слое повсюду в исследуемой акватории становится крайне низкой (Рисунок 3.5.2а), не обнаруживая сколь-нибудь значительный ее горизонтальный перенос. В действительности уже спустя два часа после взмучивания максимальная поверхностная концентрация взвеси в районе поселка Лисий Нос составила всего 30–40 мг/л, то есть упала более чем в два раза по сравнению с концентрацией на 12 часов. Аналогичная картина наблюдалась и для всех остальных отмеченных выше районов. На момент 18 часов 22 мая концентрация взвешенного песка по всей акватории в поверхностном слое практически приблизилась к нулю.

В случае же полностью илистого дна полученное решение характеризовалось значительно более высокими концентрациями взвеси. Вдоль северного побережья Невской губы, где в эксперименте с песчаным дном концентрации были 60–70 мг/л, в случае с илистым дном они достигают 600–700 мг/л, в районе Сестрорецка доходят до 550 мг/л, вдоль северо-западного побережья Кронштадта — около 300 мг/л и вдоль юго-западного берега — 400–500 мг/л. В районах баров Невы концентрации доходили до 300–500 мг/л. Иными словами, местоположение районов с максимальной интенсивностью взмучивания принципиально не изменилось, что и понятно, так как

используется один и тот же момент времени, соответственно, и внешний форсинг одинаков. Вместе с тем разница в свойствах частиц обусловила и соответствующие различия в полученном решении. Помимо явного различия значений концентрации в количественном плане, речь идет о пространственном расширении зон с высокими концентрациями взвеси. Из сравнения Рисунков 3.5.1а и 3.5.1б видно, что области с повышенными концентрациями ила значительно больше по площади, чем аналогичные районы с песчаной взвесью. Кроме того, в открытых частях акватории все же наблюдаются относительно невысокие концентрации взвеси — до 10–20 мг/л, чего не наблюдалось в эксперименте с песчаным дном. Все это объясняется тем, что величина критического напряжения, необходимая для отрыва частиц со дна, для частиц песка выше, чем для частиц ила. Помимо этого, скорость гравитационного оседания частиц песка значительно выше, чем скорость оседания частиц ила. Последнее обстоятельство влияет не только на величину концентрации в данном конкретном месте, уменьшая направленный вниз поток частиц ила по сравнению с потоком вниз для песка, но и приводит к тому, что для илистой взвеси становится заметным ее горизонтальный перенос, что видно на Рисунке 3.5.2б. При этом обнаруживается и вынос частиц ила из Невской губы в западном направлении. Предполагается, что такая ситуация не является стабильной и в долгосрочной перспективе приводила бы к вымыванию илистого донного материала из Невской губы и особенно из ее вдольбереговых районов. Что, в свою очередь, привело бы к появлению в верхнем донном слое осадков с более грубыми частицами.

Что касается вертикального распределения частиц, то здесь можно отметить более равномерную вертикальную структуры поля концентрации частиц ила по сравнению с концентрацией взвешенного песка. Вертикальные сечения, показанные на Рисунках 3.5.3 – 3.5.6, демонстрируют сказанное. Положение сечений было выбрано для наиболее репрезентативного представления результатов, чтобы включить в рассмотрение районы, где происходило взмучивание осадков. Такие районы были описаны выше и показаны на Рисунке 3.5.1. На первых двух Рисунках 3.5.3 и 3.5.4 показаны продольные сечения акватории, а на Рисунках 3.5.5 и 3.5.6 — поперечные.

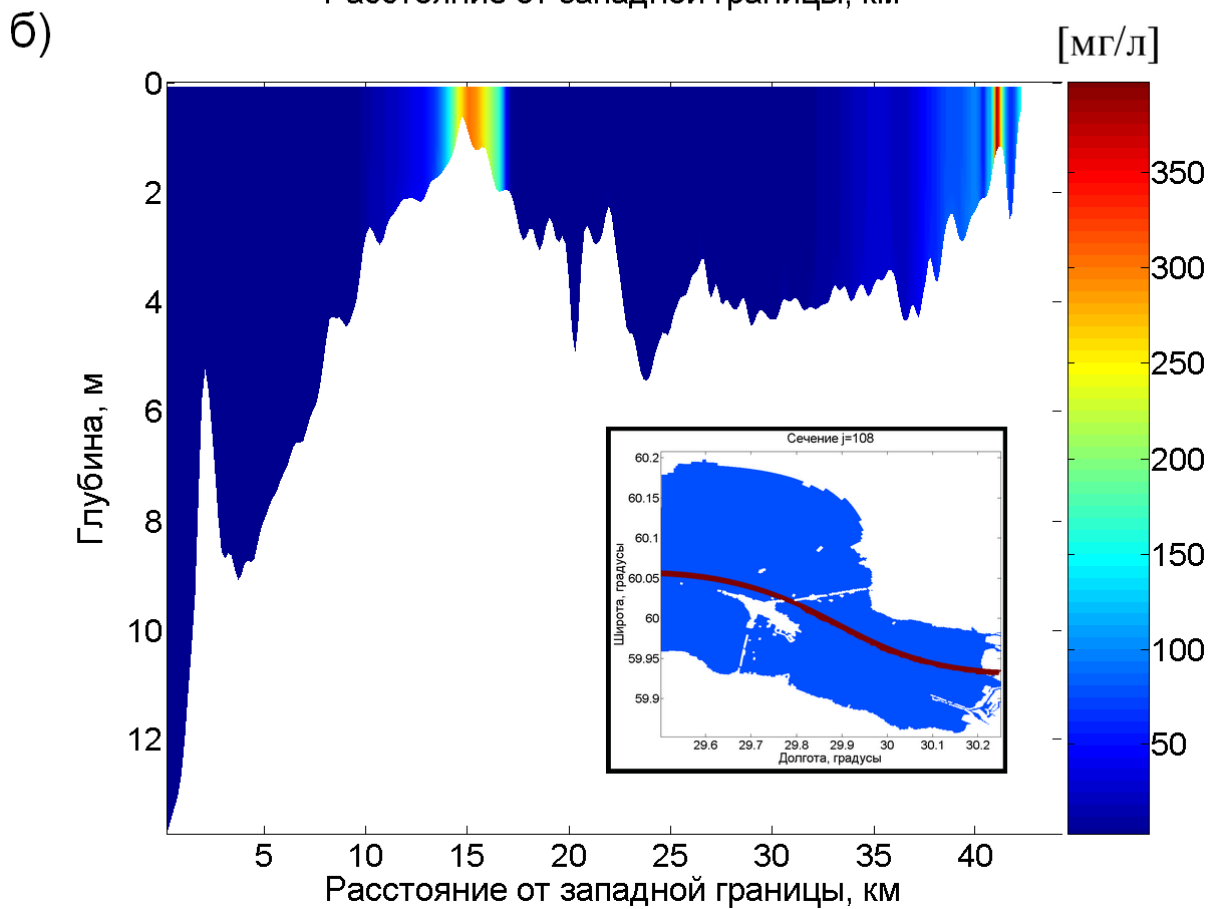
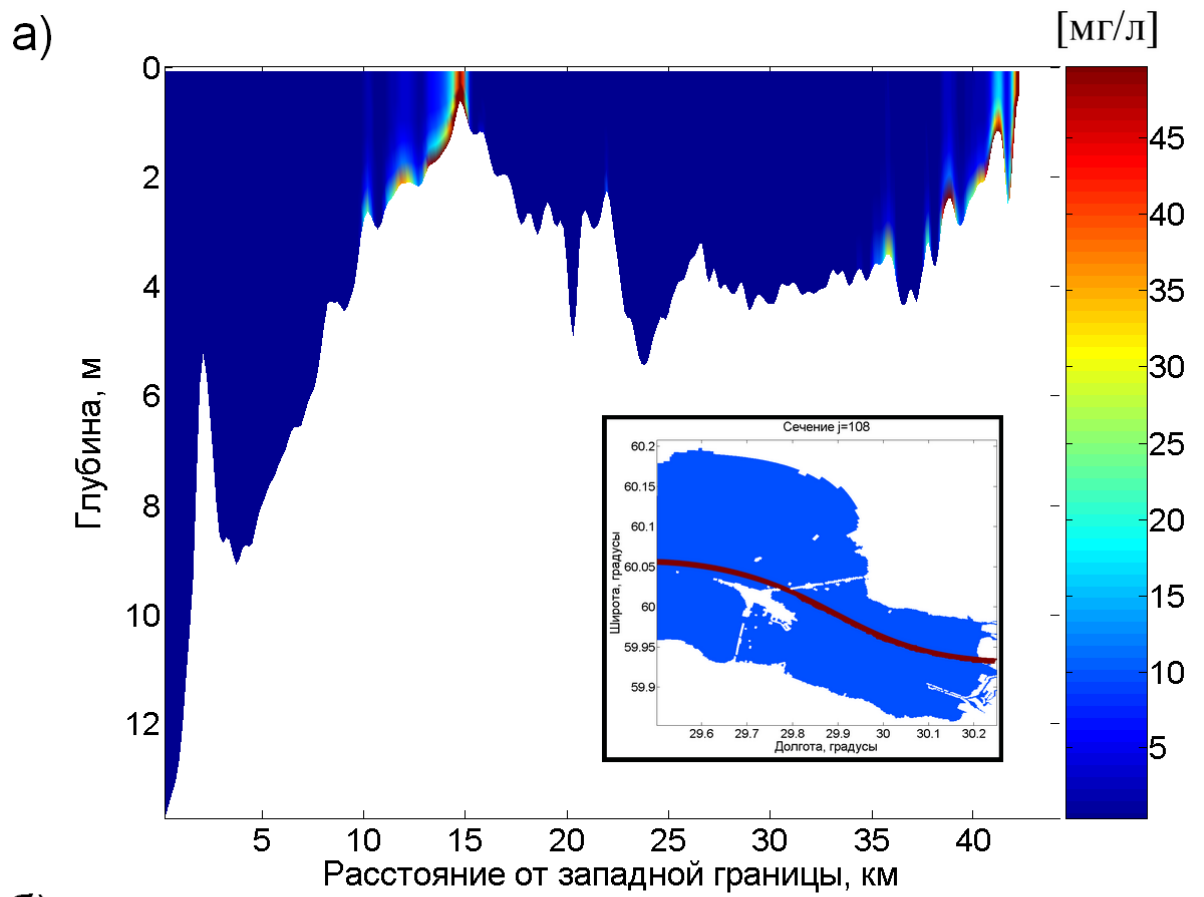


Рисунок 3.5.3 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 22 мая 2004 года. На дне задавались только пески (а) и только илы (б)

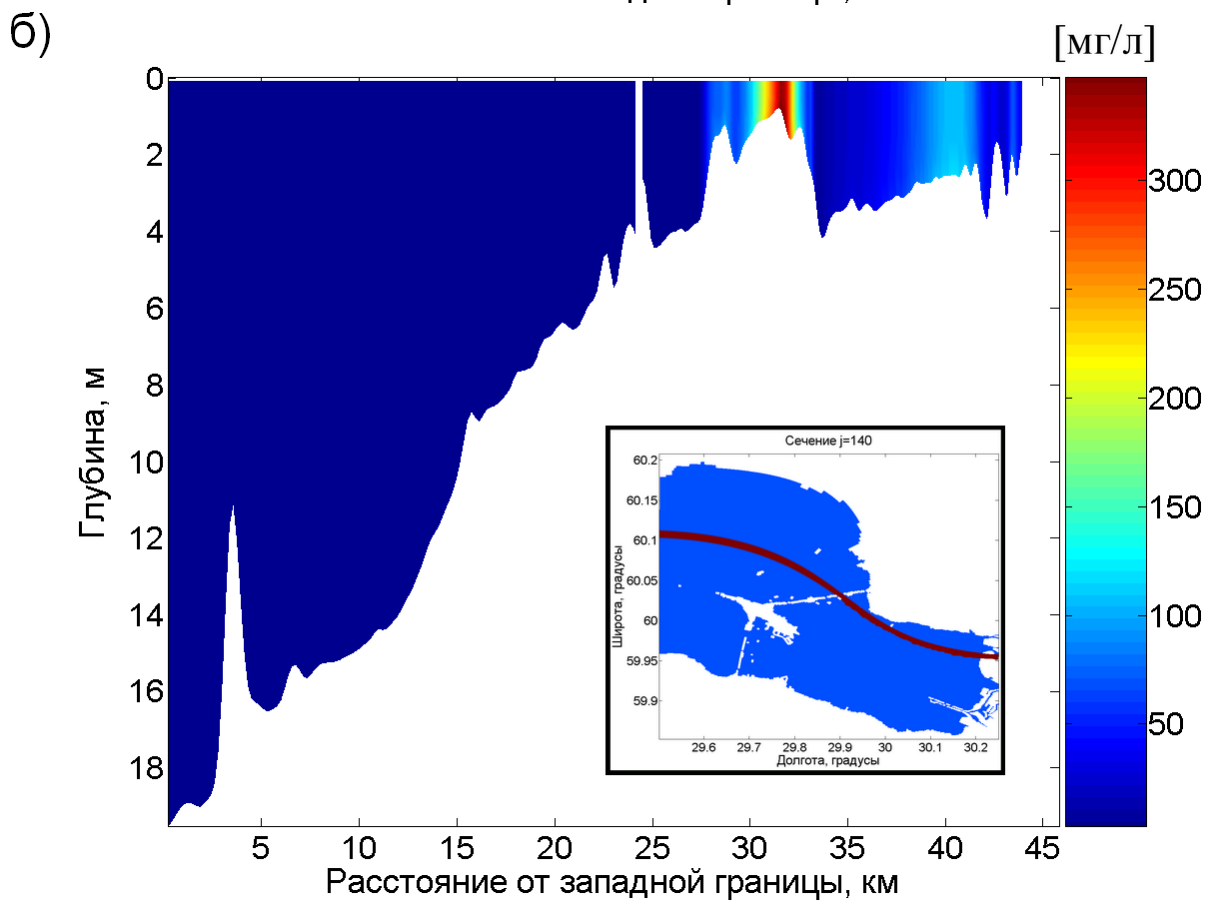
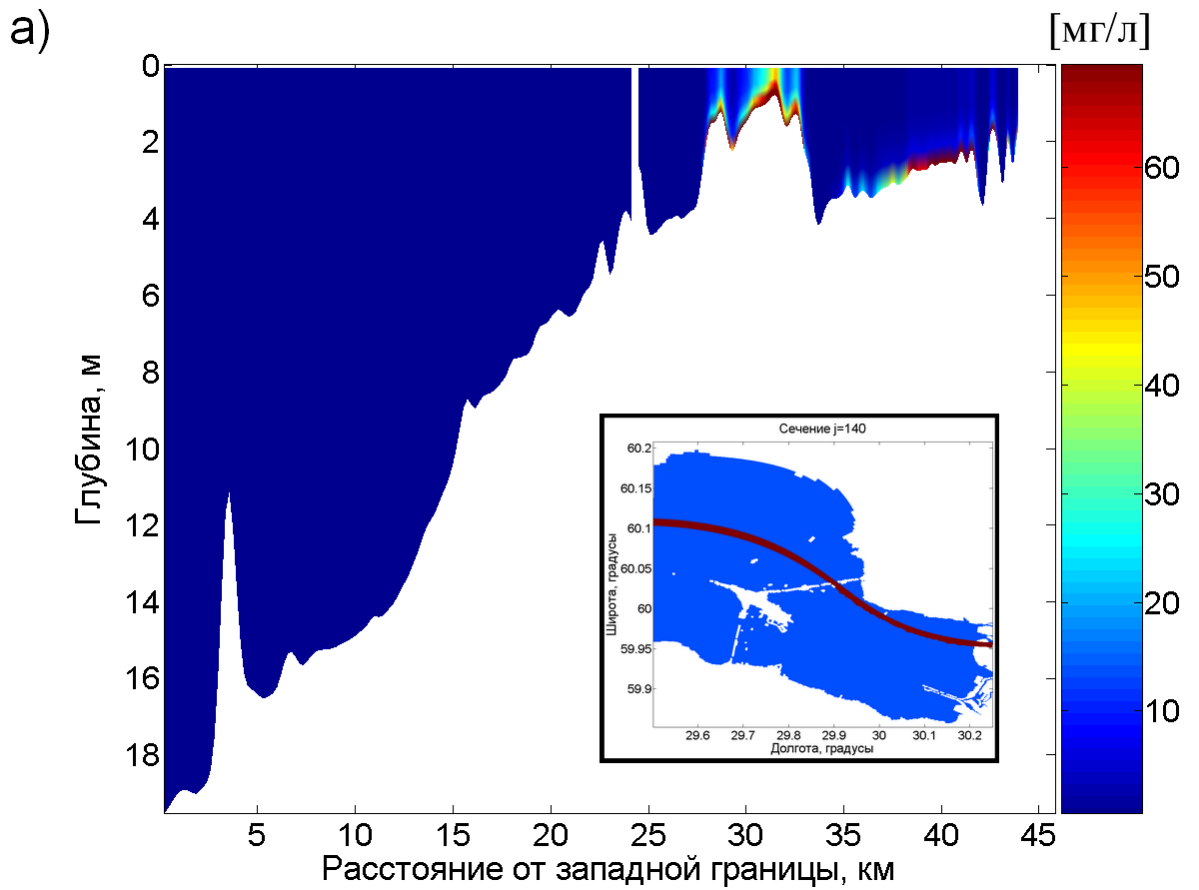


Рисунок 3.5.4 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 22 мая 2004 года. На дне задавались только пески (а) и только илы (б)

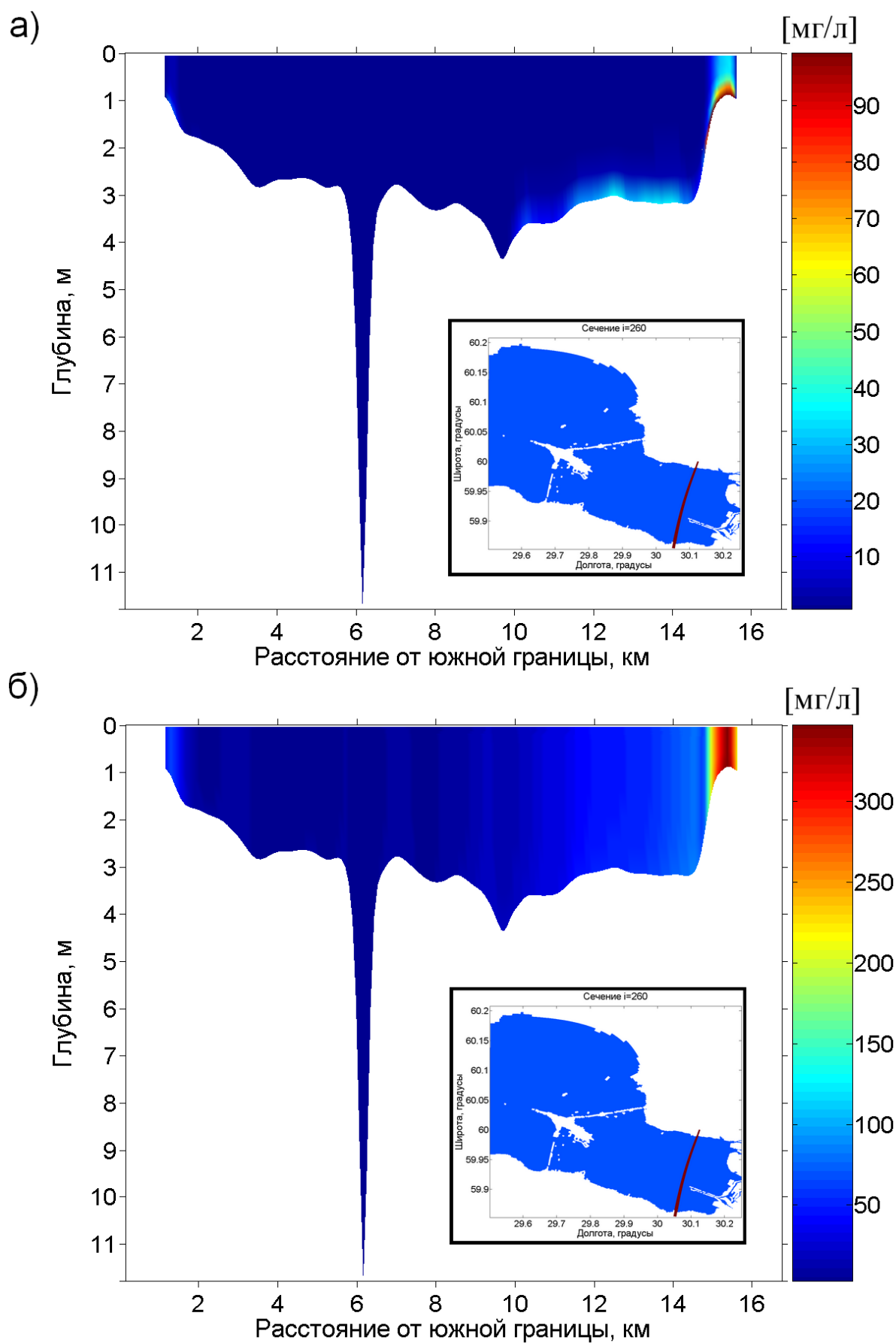


Рисунок 3.5.5 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 22 мая 2004 года. На дне задавались только пески (а) и только илы (б)

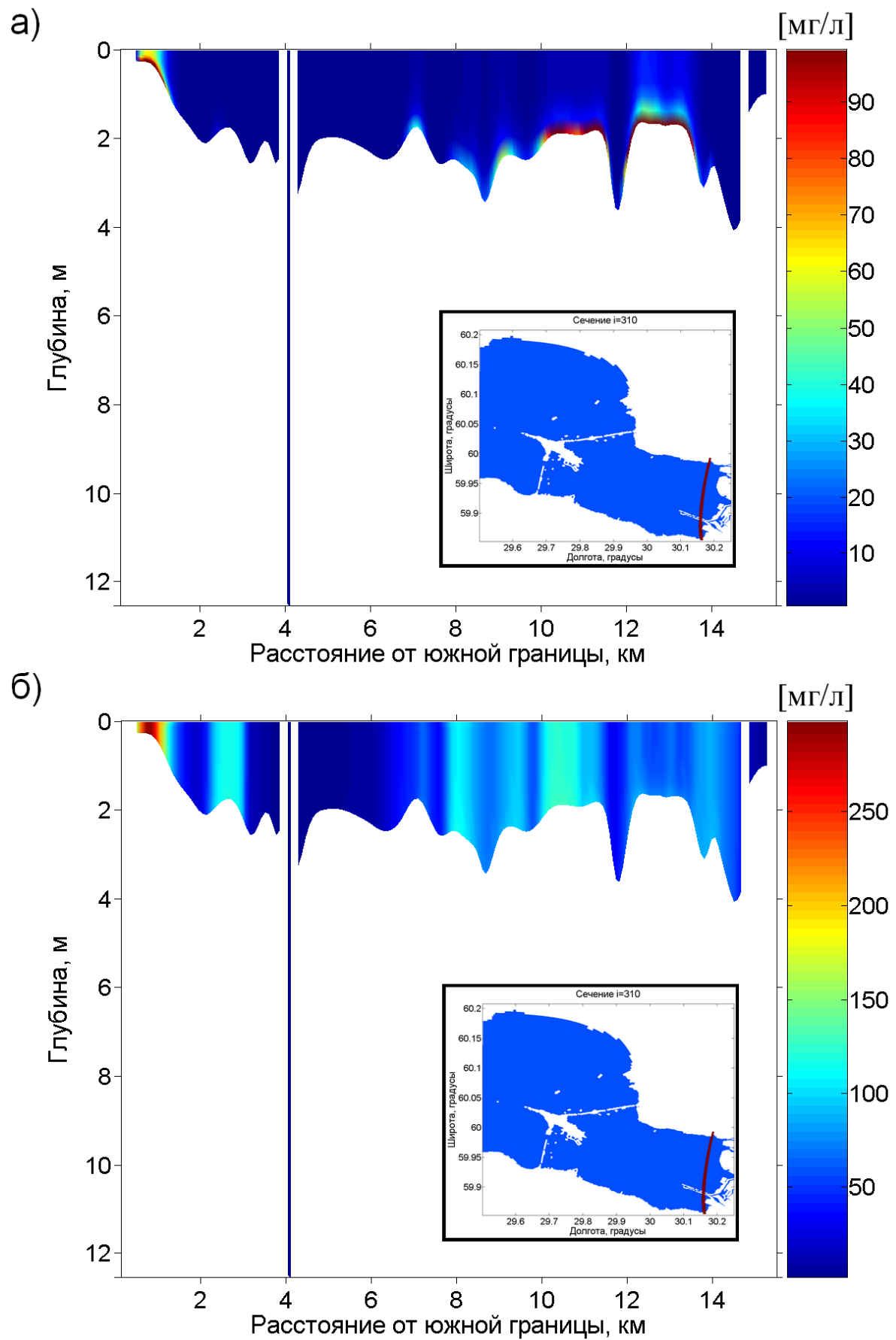


Рисунок 3.5.6 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 22 мая 2004 года. На дне задавались только пески (а) и только илы (б)

В случае задания одной лишь песчаной фракции наибольшие концентрации взвеси в районах взмучивания наблюдаются в придонном слое, сильно отличаясь по величине от поверхностной концентрации. Например, на Рисунках 3.5.3а и 3.5.4а придонная концентрация во многих районах на порядок выше поверхностной. В ряде районов заметно образование придонного слоя повышенной концентрации взвешенного песка, при том, что в вышележащих слоях воды концентрация падает почти до нуля, и эти районы никак не проявляют себя или видны слабо, если судить только по поверхностной концентрации (см. Рисунки 3.5.4а, 3.5.5а, 3.5.6а). Районы с такой вертикальной структурой поля концентрации взвеси находятся, как правило, не у самого берега и не в самых мелководных местах акватории. Такой вид вертикального профиля концентрации в них объясняется тем, что величины суммарного придонного напряжения оказывается достаточно для отрыва частиц от дна, но для их дальнейшего переноса вверх посредством турбулентной диффузии не хватает энергии. В более мелководных районах частицы все же достигают поверхностного слоя, в результате чего концентрация взвеси в нем увеличивается.

При задании только илистой фракции вертикальные профили концентрации в подавляющем большинстве районов равномерные, без существенных максимумов в придонном слое. Это вызвано тем, что такие частицы потоку легче оторвать со дна, а имеющаяся интенсивность турбулентной диффузии оказывается достаточной, чтобы выравнивать их концентрацию по глубине, перенося в вышележащие слои воды. Относительно низкая скорость оседания частиц ила по сравнению с песком также способствует этому.

Основываясь на этих результатах, 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 (2.2.1). Выделение в модели двух фракций донных осадков с сильно различающимися характеристиками частиц основано на наблюдаемом пространственном распределении осадочного материала в Невской губе и необходимостью поддержания вычислительной эффективности модели. Использование литологической карты позволило выделить области дна, характеризующиеся преобладанием в донных осадках песчаной или иловой составляющей. На Рисунке 3.5.7 показана используемая в модели схема

пространственного расположения донных осадков, созданная на основе литологической карты дна Невской губы и восточной части Финского залива [14].

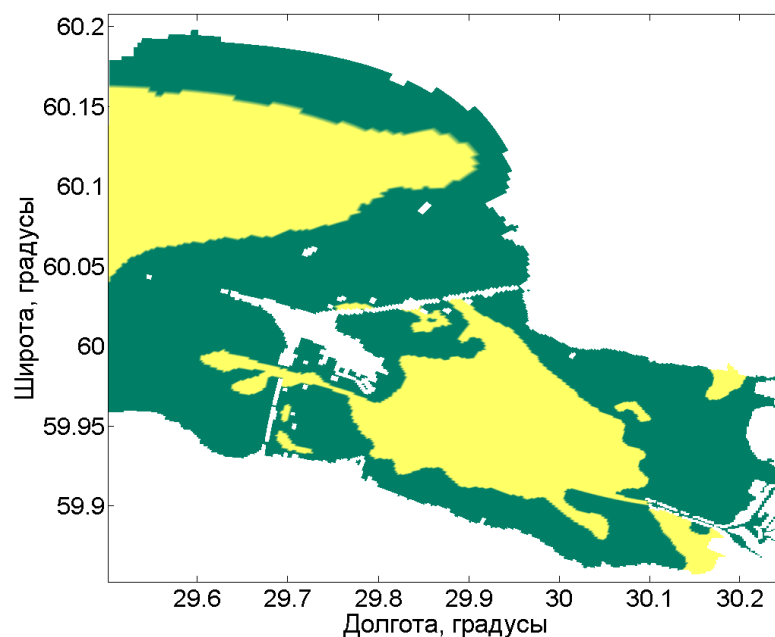


Рисунок 3.5.7 – Модельная схема расположения типов донных осадков в исследуемой области. Желтым показаны илы, зеленым – пески

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 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 кг/м³, частиц ила – 2000 кг/м³.

В настоящее время существует несколько шкал для классификации частиц донных осадков по их размеру (см., например, [22, 118, 60, 49]). В большинстве случаев используется так называемая ϕ -шкала [118, 59, 60], в основе которой лежит классификация частиц по некоторому параметру ϕ , рассчитываемому по формуле:

$$\phi = -\log_2 \frac{d}{d_0} \quad (3.5.1)$$

где d – диаметр частиц, мм, d_0 – референсный диаметр, принимаемый равным 1 мм. Согласно данной шкале, все частицы могут быть упорядочены по величине

ϕ -параметра в диапазоне от менее -8 до более чем 10 в пятнадцать различных типов в зависимости от размера частиц, начиная от глыб и валунов и до глин и коллоидных частиц. Используя соотношение (3.5.1), можно определить, что частицы более крупной фракции в модели имеют величину параметра ϕ , равную 3.2, что позволяет формально классифицировать донные осадки с этими частицами как мелкозернистый песок. Для частиц мелкой фракции параметр ϕ равен 6.8, чему соответствует ил, или алевритовые донные осадки. Аналогичные результаты получаются и при использовании международной шкалы [49].

Во всех последующих расчетах в работе используется указанная схема расположения донных осадков с соответствующими характеристиками частиц.

3.6 Влияние взвешенных частиц на плотностную стратификацию и скорости течений

В описании модели в разделе 2 было отмечено, что в нее включен учет влияния плотности взвешенных частиц на общую плотность смеси вода-взвесь. При этом были упомянуты эффекты, которые при этом появляются. На Рисунке 3.6.1а показано распределение на 12 часов 22 мая 2004 года рассчитанной поверхностной концентрации взвеси. На Рисунке 3.6.1б приводится распределение модуля разности векторов средней по глубине скорости течения для случаев с учетом и без учета влияния плотности частиц. Аналогичные изображения, но только для модуля разности векторов скорости течения в верхнем и нижнем модельных слоях, приводятся на Рисунках 3.6.1в и 3.6.1г, соответственно. Результаты этих расчетов показывают, что в зонах, где происходит взмучивание, и в воде оказываются взвешенные частицы с плотностью, отличной от плотности воды, картина течений несколько отличается от случая, когда плотность этих частиц никак не учитывается. Происходит локальная перестройка поля течений. Однако максимальные различия при этом в данном расчете не превышали 5 см/с и наблюдались лишь в небольших по площади районах вдоль северного побережья Невской губы, западного побережья острова Котлин, а также у города Сестрорецк и в устье Невы. В открытых частях акватории в силу отсутствия высоких концентраций взвеси, различия в скорости течения, как правило, не превышали 1 см/с.

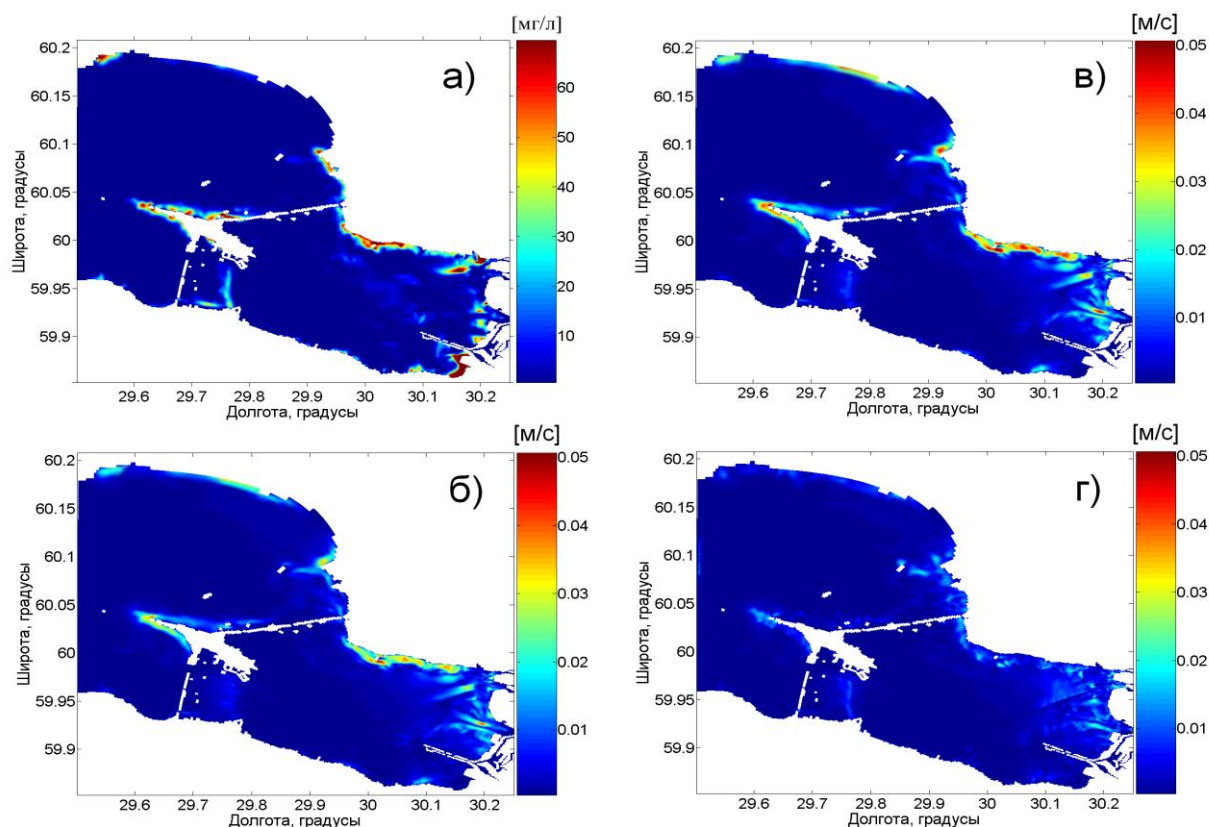


Рисунок 3.6.1 – Результаты расчетов на 12 часов 22 мая 2004 года для случаев с учетом и без учета влияния плотности частиц взвеси на плотностную стратификацию: (а) –поверхностная концентрация взвеси, (б) – модуль разности векторов средней по глубине скорости течения, (в) – модуль разности векторов скорости течения в верхнем слое, (г) – модуль разности векторов скорости течения в нижнем слое

Что касается влияния данного эффекта на распределение концентрации взвеси, то помимо некоторых изменений в адвективном переносе взвеси, возникающем вследствие перестройки поля течений, наблюдается также изменение в вертикальном профиле концентрации из-за изменения интенсивности турбулентного обмена. На Рисунках 3.6.2а и 3.6.2б показаны вертикальные разрезы поля концентрации для случаев с учетом и без учета плотности частиц взвеси соответственно на 12 часов 14 июня 2004 года, когда также наблюдалось интенсивное взмучивание в Невской губе. Как видно из представленных изображений, учет плотности частиц приводит к ослаблению вертикального обмена, вследствие чего вертикальный профиль концентрации становится менее однородным, а поверхностная концентрация взвеси уменьшается по сравнению с экспериментом, где плотность не учитывалась.

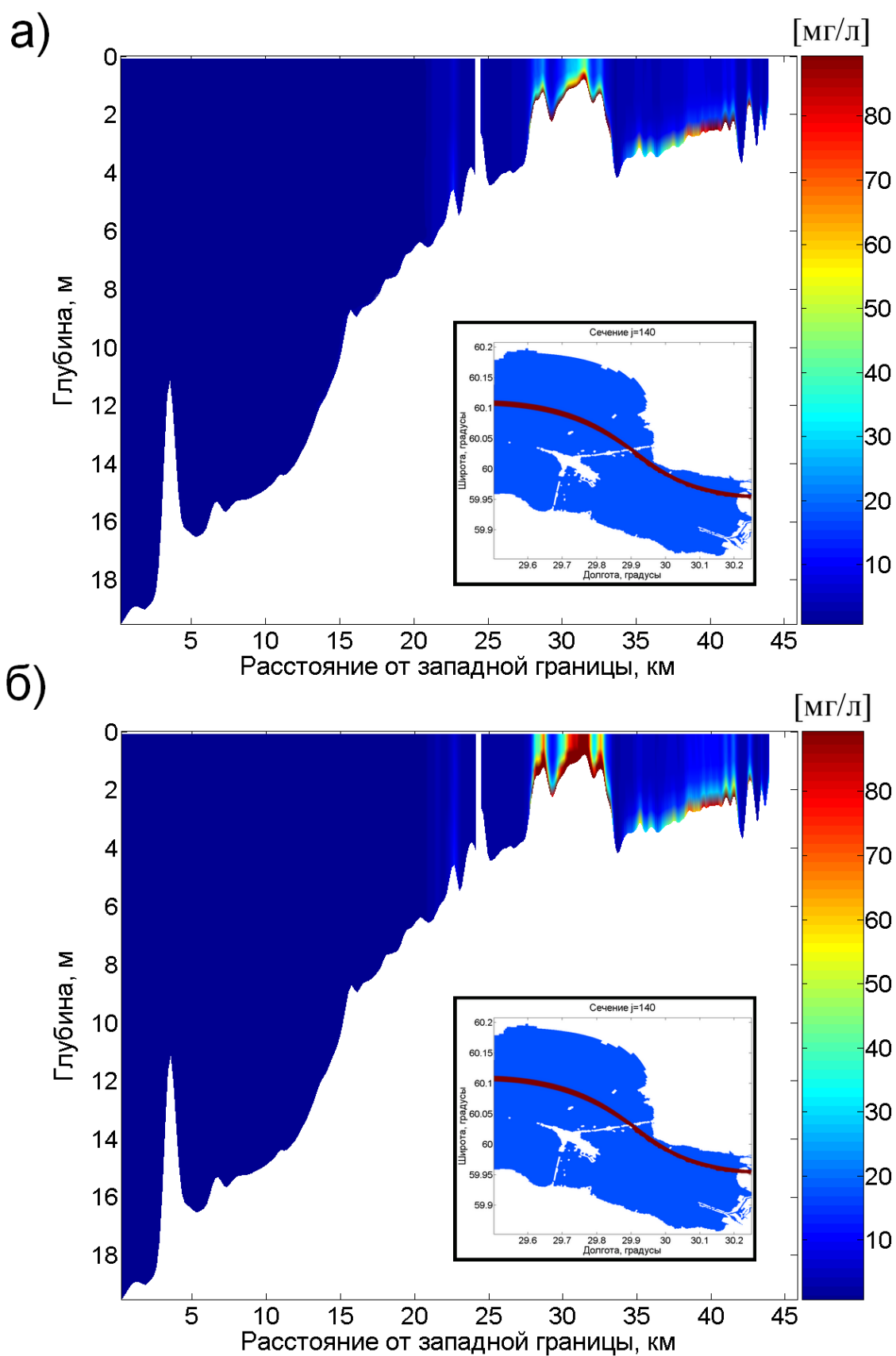


Рисунок 3.6.2 – Вертикальное сечение поля рассчитанной концентрации взвеси на 12 часов 14 июня 2004 года. Расчеты с учетом (а) и без учета (б) влияния плотности взвешенных частиц на плотностную стратификацию

Таким образом, из представленных результатов расчетов можно сделать вывод, что учет влияния плотности взвешенных частиц на плотностную стратификацию крайне важен и должен учитываться во всех расчетах для корректного воспроизведения не только поля концентрации взвеси, но и других гидрологических характеристик.

3.7 Чувствительность решения к параметрам когезии донных осадков

Когезией донных осадков называется сцепление их частиц под действием сил притяжения различной природы. Влияние когезии на величину критического напряжения, необходимого для отрыва частиц от дна, особенно заметно для мелкозернистых фракций донных осадков. Вследствие отсутствия надежных данных о влиянии органического материала на когезию, в том числе в Невской губе, в модели она параметризуется только посредством учета доли глинистого материала в песчаных осадках и размера алевритовых частиц в иловых осадках по соотношениям (2.2.22). Наибольшая неопределенность при этом связана с заданием доли глинистых осадков и значения коэффициента γ . При этом наблюдается высокая чувствительность решения к различным значениям указанных коэффициентов. В качестве иллюстрации сказанного на Рисунке 3.7.1 приводится ситуация с содержанием взвеси в поверхностном слое воды на момент времени 10 часов 15 июня 2004 года. На Рисунке 3.7.1а изображено поле концентрации при отсутствии глинистого материала в осадках $p_{clay} = 0.0$ и коэффициенте когезии для илов $\gamma = 1.0$, а на Рисунке 3.7.1б — то же, но при $p_{clay} = 0.4$ и $\gamma = 2.0$. Все остальные параметры и условия расчетов не менялись. Как видно из представленных результатов, концентрации в обоих случаях сильно различаются не только количественно, но и качественно: зоны максимумов поверхностной концентрации совпадают не всегда. Это вызвано тем, что данные коэффициенты очень сильно влияют на величину критического напряжения. Если рассчитать базовое значение критического напряжения для обеих фракций с указанными выше используемыми в модели характеристиками частиц по выражениям (2.2.19) – (2.2.20), то окажется, что для песка $\tau_{cr,0} = 0.104 \text{ Н/м}^2$, а для ила $\tau_{cr,0} = 0.023 \text{ Н/м}^2$. Далее, используя выражение

(2.2.21) для определения итогового значения критического напряжения, получаем, что для первого расчета (Рисунок 3.7.1а) величина критического напряжения

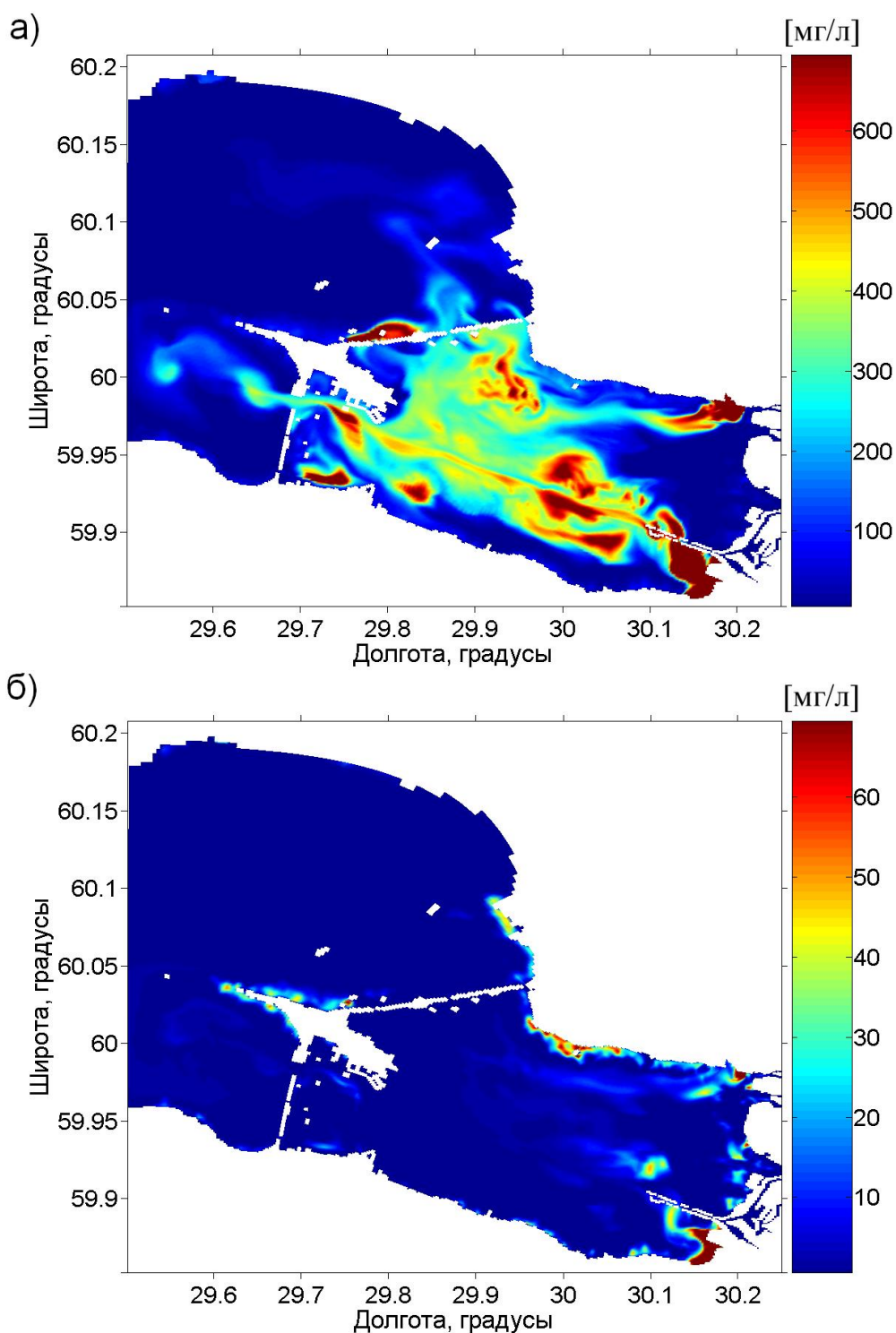


Рисунок 3.7.1 – Пространственное распределение рассчитанной концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое воды на 10 часов 15 июня 2004 года. а)

$$p_{clay} = 0.0, \gamma = 1.0; \text{ б) } p_{clay} = 0.4, \gamma = 2.0$$

та же: для песка $\tau_{cr} = 0.104 \text{ Н/м}^2$ и для ила $\tau_{cr} = 0.023 \text{ Н/м}^2$, что соответствует отсутствию влияния эффектов когезии, тогда как для второго расчета (Рисунок 3.7.1б) для песка $\tau_{cr} = 0.285 \text{ Н/м}^2$ и для ила $\tau_{cr} = 0.157 \text{ Н/м}^2$. Значения критического напряжения, полученные с учетом и без учета эффекта когезии и содержания глинистой фракции, для песков и илов в этих численных экспериментах различаются более чем в 2.7 и 6.8 раз соответственно, что свидетельствует о сильном влиянии когезии на возможность и интенсивность взмучивания. При $\gamma = 1$ иловые донные осадки подвержены взмучиванию в значительно большей степени, чем при $\gamma = 2$. В этом случае отмечается даже существенный вынос взвешенного вещества за пределы Невской губы. При $\gamma = 2$ взмучивание наблюдается преимущественно во вдольбереговой полосе, при этом основную массу взвеси составляют песчаные частицы.

Следует также отметить, что наличие глинистой фракции в донных осадках (коэффициент p_{clay}) используется в модели не только для определения когезионной поправки для вычисления критического напряжения для песков, но и при расчете нижнего граничного условия для концентрации частиц песка и ила, используя соотношения (2.2.3) и (2.2.5). В результате, зависимость концентрации взвеси от величины p_{clay} принимает довольно сложный характер. На Рисунке 3.7.2 показаны некоторые результаты из серии проведенных промежуточных калибровочных модельных расчетов с заданием различных значений доли глинистой фракции p_{clay} и когезионного коэффициента γ . Помимо варьирования коэффициента γ , доля глинистой фракции p_{clay} в донных осадках в ряде расчетов задавалась различной для песков и для илов.

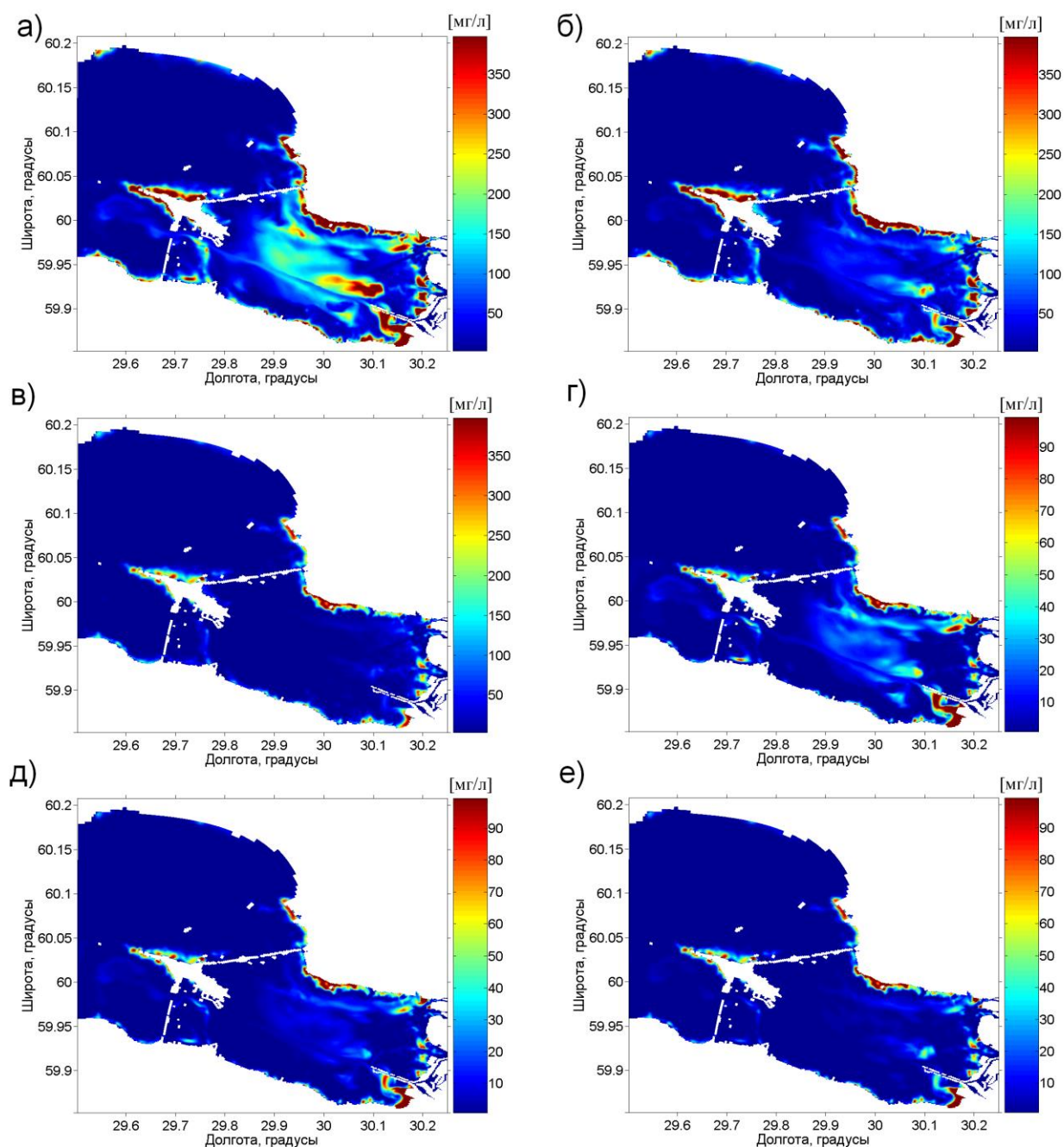


Рисунок 3.7.2 – Калибровка модели взмучивания. Рассчитанная концентрация взвешенного минерального вещества в поверхностном слое воды на 10 часов 15 июня 2004 года при различных значениях коэффициентов γ и p_{clay} . а) $\gamma = 1.5$, $p_{clay} = 0.1$ для ила, $p_{clay} = 0.0$ для песка; б) $\gamma = 1.7$, $p_{clay} = 0.1$ для ила, $p_{clay} = 0.0$ для песка; в) $\gamma = 2.0$, $p_{clay} = 0.1$ для всех осадков; г) $\gamma = 1.8$, $p_{clay} = 0.3$ для всех осадков; д) $\gamma = 1.9$, $p_{clay} = 0.3$ для всех осадков; е) $\gamma = 2.0$, $p_{clay} = 0.3$ для всех осадков

По приведенным рисункам можно оценить влияние этих коэффициентов на получаемое решение. Видно, что модель взмучивания сильно чувствительна к изменениям коэффициентов p_{clay} и γ , следовательно, они должны быть выбраны путем сравнения с данными натурных наблюдений. Этот выбор в настоящей работе осуществлялся на основе визуального сравнения результатов расчета с данными спутниковых измерений [13], выполненного в следующем разделе.

3.8 Калибровка и валидация модели взмучивания

Репрезентативное сравнение модельных расчетов с данными спутниковых наблюдений возможно только для периодов времени, когда взмучивание в Невской губе происходит достаточно интенсивно, чтобы обеспечить заметные концентрации взвеси в поверхностном слое воды. Такая ситуация возникает при ветровом волнении, вызванном сильными ветрами. Дело осложняется тем, что периоды сильных ветров часто совпадают с периодами значительной облачности над Невской губой, препятствующей спутниковым измерениям поверхностной концентрации взвеси. В результате для рассматриваемого периода 2004 года было найдено всего два спутниковых снимка, удовлетворяющих указанным выше условиям. Далее приводится детальное сравнение спутниковых оценок поверхностной концентрации взвеси, предоставленных Лабораторией спутниковой океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета, с результатами модельных расчетов.

На Рисунке 3.8.1а показано пространственное распределение суммарной концентрации взвешенного вещества TSM (Total Suspended Matter) в Невской губе на 10 часов 15 июня 2004 года, полученное в результате обработки данных уровня L2 спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Aqua [13]. Обработка исходных данных спутниковых измерений выполнялась согласно алгоритму, изложенному в работе [58]. На Рисунке 3.8.1б приводится модельное распределение рассчитанной поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени.

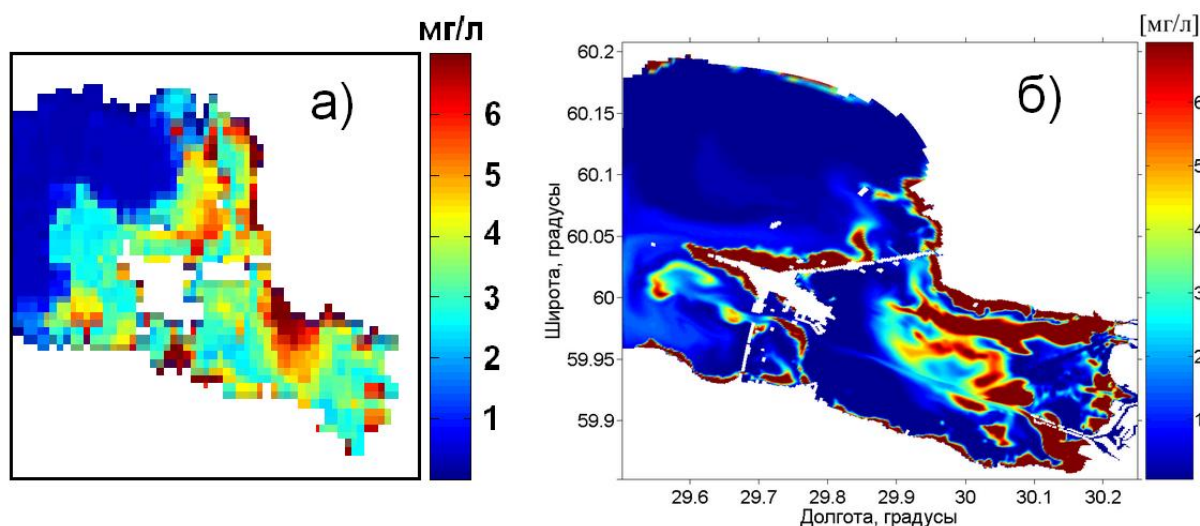


Рисунок 3.8.1 – а) Пространственное распределение TSM в Невской губе по спутниковым данным на 10 часов 15 июня 2004 года. б) Рассчитанное поле поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени при $\gamma = 1.95$ и $p_{clay} = 0.3$

Несмотря на низкое качество изображения, построенного по спутниковым данным (пространственное разрешение составляет примерно 1×1 км), его использование позволило подобрать значения коэффициентов γ и p_{clay} , обеспечивающие наилучшее согласие рассчитанного распределения поверхностной концентрации минеральной взвеси с указанным спутниковым распределением TSM. Эти значения оказались следующими: $\gamma = 1.95$, $p_{clay} = 0.3$. Соответствующие указанному содержанию глинистой фракции в осадках и когезионному коэффициенту значения критического сдвигового придонного напряжения, вычисленные по формулам (2.2.19)–(2.2.23), для частиц песка и ила составили соответственно 0.228 Н/м^2 и 0.142 Н/м^2 . В Таблице 3.8.1, таким образом, приводится суммарная информация по используемым в модели характеристикам донных осадков.

Следует отметить, что из-за отсутствия данных о содержании органического материала в донных осадках Невской губы и его влияния на когезию (поправка ϕ_{bio} в выражении (2.2.21) для критического придонного напряжения), коэффициент p_{clay} в данном случае можно считать также косвенно регулирующим влияние органического материала, который усиливает когезию и препятствует отрыву частиц от дна. Кроме этого, так как эмпирический коэффициент γ , согласно [110], должен лежать в

диапазоне от 1 до 2, то в том случае, когда этого диапазона недостаточно для успешной калибровки модели, можно варьировать эмпирический коэффициент α в выражении (2.2.17), так как он влияет на величину поправки на уплотненность φ_{pack} для критического напряжения, вычисляемую по формуле (2.2.23). Однако в этом случае, помимо изменения величины критического напряжения, будет меняться и поправка на флокуляцию для скорости оседания, определяемая по выражению (2.2.16). В настоящей работе калибровка модели не потребовала изменения величины коэффициента α , и он был оставлен равным 1.

Таблица 3.8.1 – Суммарная информация по используемым в модели характеристикам донных осадков

Донные осадки	Размер частиц, мкм	Плотность частиц, кг/м ³	Скорость оседания единичной частицы, м/с	Базовое критическое напряжение, Н/м ²	Итоговое критическое напряжение, Н/м ²
Песок	110	2370	7.5×10^{-3}	0.104	0.228
Алеврит (ил)	9	2000	4.2×10^{-5}	0.023	0.142

Согласно рассчитанному распределению поверхностной концентрации взвешенных частиц, изображенному на Рисунке 3.8.1б, максимальные концентрации взвеси наблюдаются вдоль северного побережья Невской губы, вдоль западного побережья острова Котлин, в небольших районах в устье Невы, в мелководном районе к югу от острова Котлин на Ломоносовской отмели. Также повышенная концентрация обнаруживается во вдольбереговой полосе вне пределов Невской губы к северу от КЗС в районе Сестрорецка. Кроме того, вдоль южного побережья Невской губы в узкой полосе также заметны повышенные концентрации взвеси. Высокие концентрации заметны также и к югу от дамб Морского канала в юго-восточной части Невской губы. Приведенное распределение свидетельствует также о небольшом выносе взвешенного вещества за пределы Невской губы через судопропускное сооружение С1 КЗС с образованием пятна повышенной концентрации между островом Котлин и южным берегом Финского залива. В определенной степени это

пятно соответствует пятну повышенной концентрации на Рисунке 3.8.1а, расположенному к юго-западу от острова Котлин: положение пятен почти совпадает, и концентрации взвеси в них близки. Указанные характерные черты рассчитанного поля поверхностной концентрации близки к тем, что видны на изображении, построенному по спутниковым данным (Рисунок 3.8.1а).

Хотя распределения концентрации взвеси, приведенные на Рисунке 3.8.1, во многом схожи, имеются и существенные различия между ними. Модельные результаты в полной мере не отразили наблюдаемый шлейф вод с повышенной концентрацией взвеси к северу от водопропускного сооружения ВЗ: хотя шлейф в модельных результатах присутствует, но он меньше по размеру и менее протяжен в северном направлении от дамбы. К сожалению, рассчитанные концентрации во вдольбереговой полосе Кронштадта оказались превышены, однако это объясняется тем, что согласно литологической карте, донные осадки вблизи Кронштадта сложены не столько песками, сколько 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. Кроме этого, 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 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. Иными словами, настоящая модель ограничена лишь двумя фракциями донных частиц, тогда как в реальности в донных осадках в большей или меньшей степени присутствуют частицы всех размеров. С другой стороны, нельзя полностью полагаться и на восстановленные по спутниковым данным распределения TSM, точность которых все еще довольно низка. 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 частиц вследствие каких-либо гидротехнических работ, сбросов отходов, речного стока Невы и так далее, которые в модели не учитываются, даже

при том факте, что для анализа был выбран временной отрезок, характеризующийся, по доступной информации, минимальным влиянием искусственных источников взвеси.

Для проверки влияния речного стока на итоговое поле концентрации взвеси, то есть для учета наличия взвеси, поступающей вместе с невскими водами, но фактически не являющейся взмучиваемой со дна в самой Невской губе, в модель дополнительно 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. Иными словами, отсутствовало поступление взвеси данной фракции со дна, то есть на нижней границе при $\sigma \rightarrow -1$ ставилось условие:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} = 0 \quad (3.8.1)$$

Данное граничное условие для третьей фракции частиц, поступающей с речным стоком, отличается от соответствующего нижнего условия для двух других фракций, задаваемых в Невской губе, именно отсутствием потока взвеси со дна. Вследствие этого, поток на нижней границе определялся только гравитационным оседанием частиц. При этом такая взвесь рассматривалась почти как пассивная. Скорость оседания частиц этой фракции, после проведенной серии калибровочных расчетов, задавалась равной 2.0×10^{-6} м/с. Для сравнения, без учета поправок на затрудненное оседания и флокуляцию, скорости оседания частиц песка и ила, как видно из Таблицы 3.8.1, оказались равными 7.5×10^{-3} м/с и 4.2×10^{-5} м/с, соответственно.

На Рисунке 3.8.2 приведено сравнение спутниковых данных с рассчитанным полем концентрации при учете дополнительного поступления взвеси с водами реки Невы. Как видно из данного рисунка, после поступления взвеси в Невскую губу она начинает постепенно оседать. Во многих районах, расположенных западнее КЗС, поверхностная концентрация уменьшается до 1–2 мг/л. Результат данного расчета уже ближе к тому, что получено по спутниковым данным.

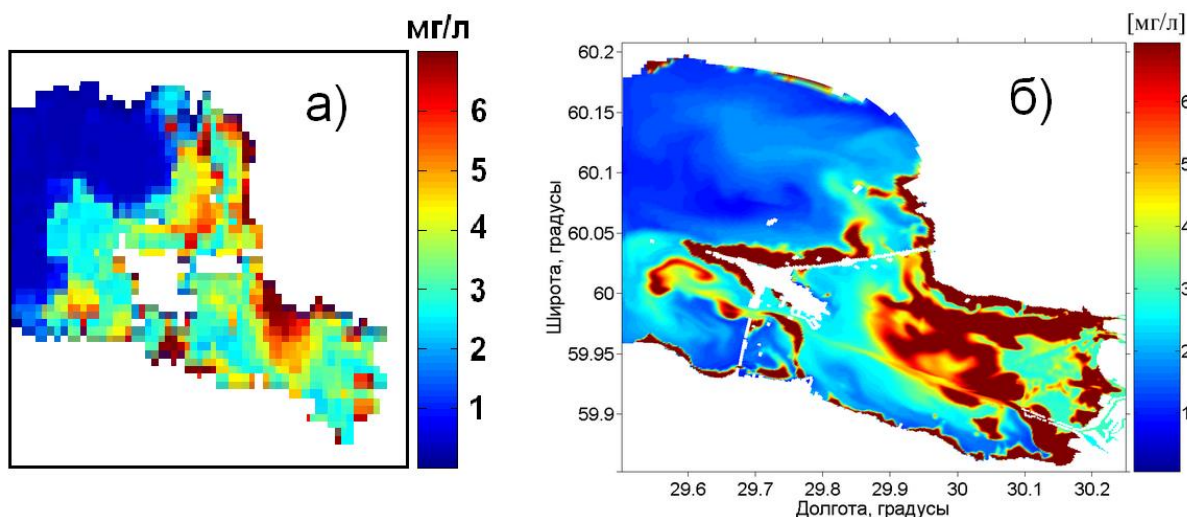


Рисунок 3.8.2 – а) Пространственное распределение TSM в Невской губе по спутниковым данным на 10 часов 15 июня 2004 года. б) Рассчитанное поле поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени при $\gamma = 1.95$ и $p_{clay} = 0.3$ и при поступлении третьей фракции частиц концентрацией 3 мг/л с невской водой

Корректность значений выбранных коэффициентов и общей настройки модели подтверждается также Рисунком 3.8.3, на котором приводится сравнение распределения взвешенного вещества в Невской губе согласно спутниковым данным и рассчитанной поверхностной концентрации взвеси на 11 часов 4 июня 2004 года. При этом значения всех подобранных ранее эмпирических параметров не менялись. Из Рисунка 3.8.3а видно, что концентрация взвеси в центральной части Невской губы на этот момент составляла 4–6 мг/л, в то же время вдоль северного и южного берегов она была выше: до 7 мг/л и более. Повышенная концентрация наблюдается также в районе города Сестрорецка и в устье Невы. Эти характерные особенности удалось получить и в модельном расчете (Рисунок 3.8.3б). Однако в модельной оценке несколько завышенной оказалась поверхностная концентрация взвеси вне Невской губы к западу от КЗС, вызванная, в том числе, поступлением взвеси с речным стоком Невы и ее дальнейшим переносом в западном направлении. Похожая ситуация наблюдалась также и на Рисунке 3.8.2. Предположительно, это вызвано не совсем точным заданием скорости оседания частиц этой третьей фракции. Однако непосредственно к процессу взмучивания это отношения не имеет: эта взвесь не была поднята со дна в исследуемой акватории, а лишь была добавлена в модель с целью

проверить предположение о характере происхождения некоторой фоновой концентрации взвеси в Невской губе.

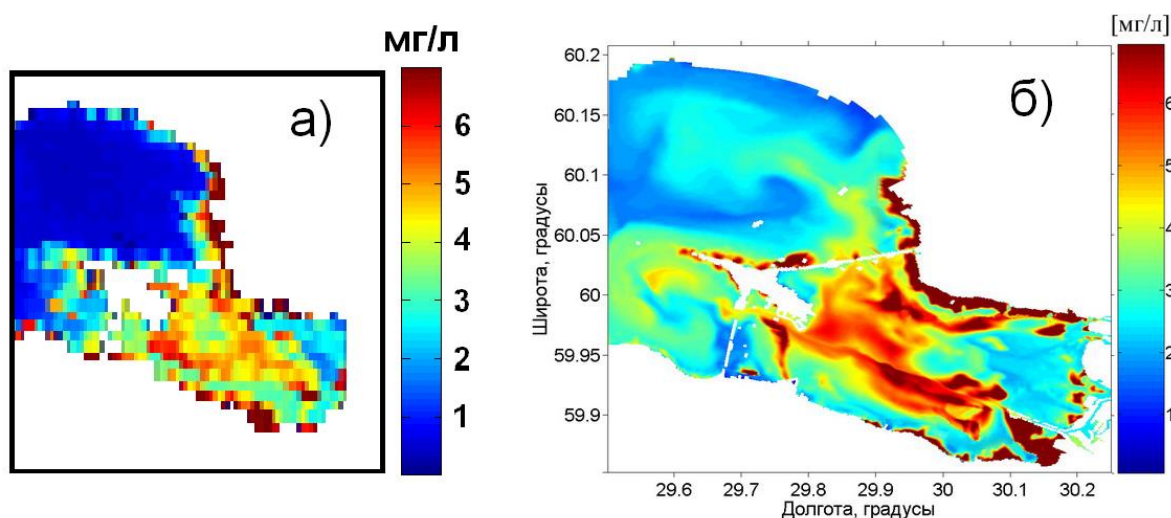


Рисунок 3.8.3 – а) Пространственное распределение TSM в Невской губе по спутниковым данным на 11 часов 4 июня 2004 года. б) Рассчитанное поле поверхностной концентрации минеральной взвеси на тот же момент времени при $\gamma = 1.95$ и $p_{clay} = 0.3$ и при поступлении третьей фракции частиц концентрацией 3 мг/л с невской водой

В последующих расчетах, обсуждаемых в следующем разделе, третья фракция взвешенных частиц, поступающая с водами реки Невы, не учитывалась, так как наибольший интерес представляло изучение непосредственно самого процесса взмучивания донных осадков в Невской губе без влияния прочих источников на суммарную концентрацию взвеси.

4 Временная изменчивость взмучивания в Невской губе в безледный период

В настоящем разделе приводятся результаты модельных расчетов по взмучиванию донных осадков в Невской губе, проведенные для длительных временных периодов, а именно для безледных периодов 2008 и 2013 года.

4.1 Выбор лет для расчета

Ветровое волнение играет главную роль во взмучивании донных осадков в прибрежных районах, где приливные колебания малы. С целью оценить интенсивность взмучивания в Невской губе на длительных временных периодах были выполнены расчеты для двух лет, характеризующихся сильными и слабыми или умеренными ветрами. В Таблице 4.1.1 приведена статистика повторяемости ветра на метеостанции Кронштадт за 2008–2013 годы для периода с 1 мая по 30 ноября. К сожалению, полные ряды метеоданных со станции Кронштадт для периодов с мая по ноябрь для лет ранее 2008 года были недоступны, поэтому для анализа использовались только эти шесть лет. Скорость ветра измерялась каждые 3 часа. На Рисунке 4.1.1 показано графическое представление данных Таблицы 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Повторяемость случаев наблюдения ветра со скоростью равной или выше указанной на метеостанции Кронштадт за 2008–2013 годы (с 1 мая по 30 ноября)

Год (с 01.05 по 30.11)	Число случаев наблюдения ветра со скоростью равной или выше указанной					Максимальный ветер за весь период, м/с
	5 м/с	7 м/с	9 м/с	11 м/с	13 м/с	
2008	382	118	37	6	1	13
2009	263	65	7	0	0	10
2010	179	34	17	2	0	12
2011	313	65	19	2	0	11
2012	285	65	15	5	1	13
2013	183	44	4	0	0	10

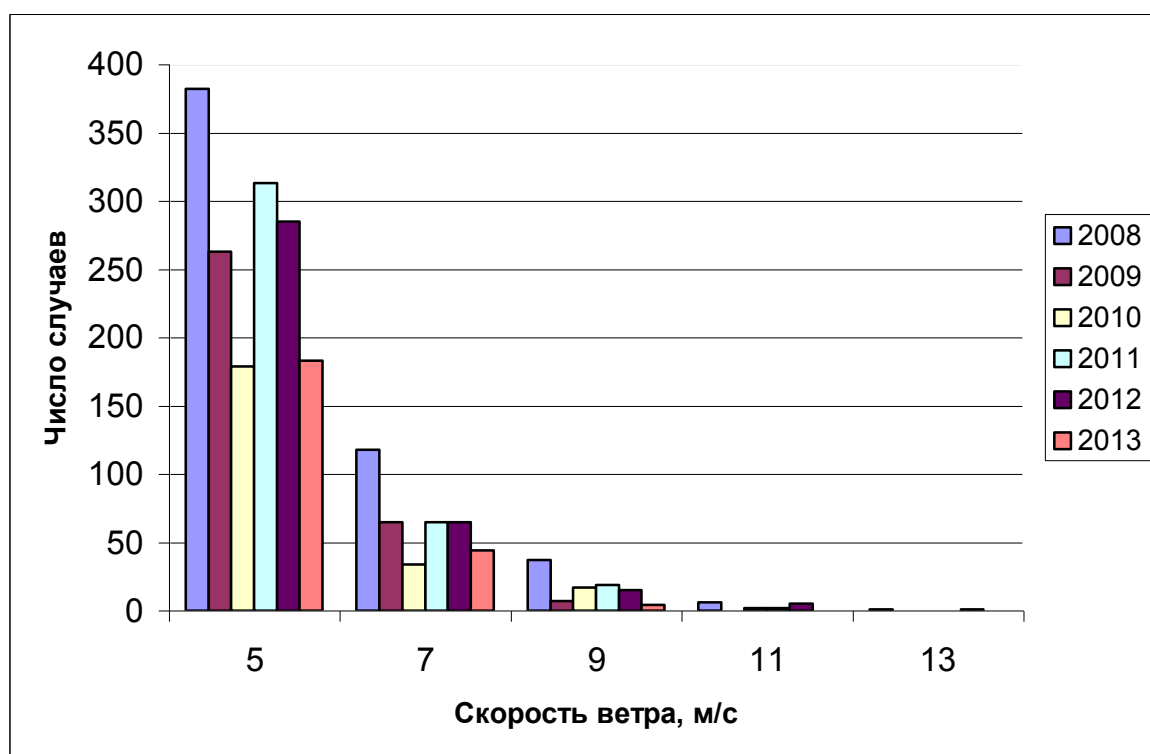


Рисунок 4.1.1 – Повторяемость случаев наблюдения ветра со скоростью равной или выше указанной (на оси абсцисс) на метеостанции Кронштадт за 2008–2013 годы (с 1 мая по 30 ноября)

Исходя из данных о ветре, приведенных в Таблице 4.1.1, в качестве года с сильными ветрами был выбран 2008 год, а со слабыми — 2013 год. При этом также принималась во внимание доступность данных по уровню для задания на западной границе области, которые для многих лет содержат в ряде случаев значительные пропуски. Расчеты для обоих лет проводились для безледного периода с 1 мая по 30 ноября.

4.2 Сезонные изменения концентрации взвешенного вещества в 2008 и 2013 годах

На Рисунке 4.2.1 показано положение трех точек в Невской губе, обозначенных буквами L, N и С и выбранных для анализа временного хода рассчитанной поверхностной концентрации взвеси в них.

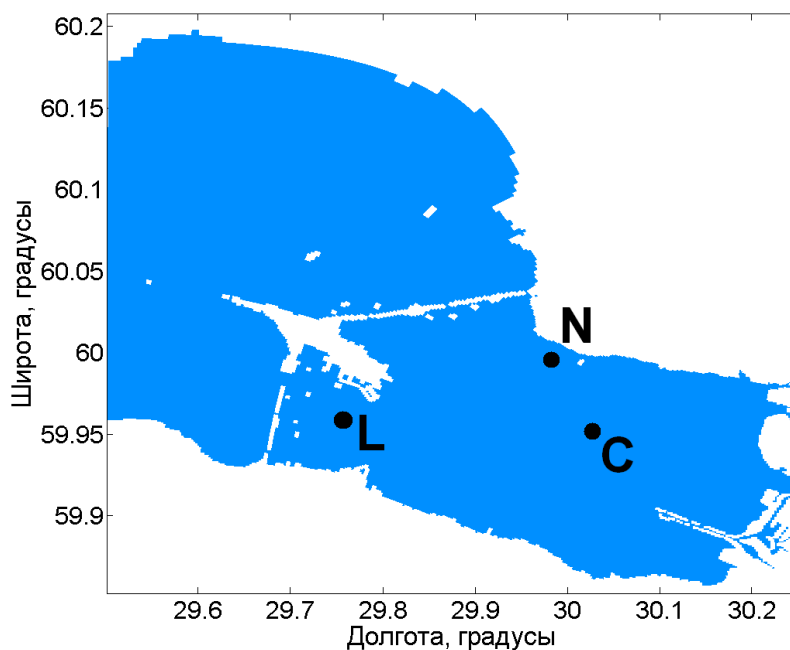


Рисунок 4.2.1 – Положение трех точек в Невской губе, выбранных для анализа временного хода концентрации взвеси

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. На Рисунке 4.2.2 показан временной ход рассчитанной поверхностной концентрации взвеси и модуля скорости ветра в трех точках L, N и C для 2008 года. В весенний и летний периоды 2008 года, как видно из графиков, повышенные значения концентрации иногда наблюдались в основном в прибрежных и очень мелководных районах (точки L и N), тогда как центральная часть Невской губы (точка C) была практически свободна от взвеси. Однако на всех графиках виден пик поверхностной концентрации, соответствующий летнему периоду, и приходящийся на 9 июня, когда наблюдался сильный западный ветер со скоростью 10 м/с. Другим примечательным моментом была дата 26 октября, когда из-за сильного и продолжительного действия юго-западного ветра скоростью 10–13 м/с в точке C рассчитанная поверхностная концентрация превысила значение 35 мг/л, а в других центральных частях Невской губы она достигала 60–70 мг/л.

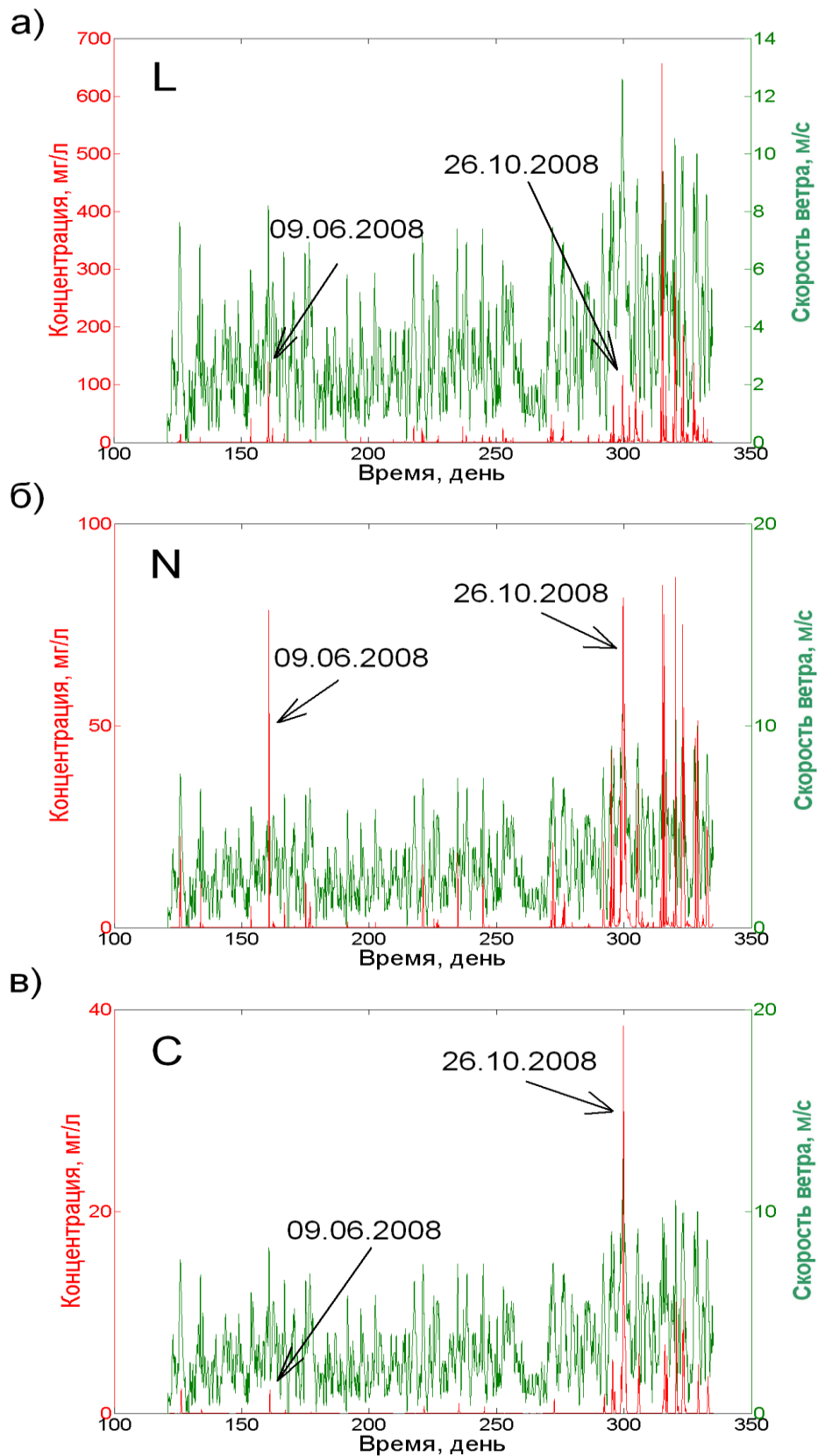


Рисунок 4.2.2 – Временной ход рассчитанной поверхностной концентрации взвешенных частиц (красная кривая) и модуля скорости ветра (зеленая кривая) за период 01.05–30.11 2008 года в трех точках в Невской губе: а) в точке L; б) в точке N; в) в точке C

На Рисунке 4.2.3 приводится распределение рассчитанной поверхностной концентрации взвешенного вещества для двух моментов времени, показанных стрелками на Рисунке 4.2.2.

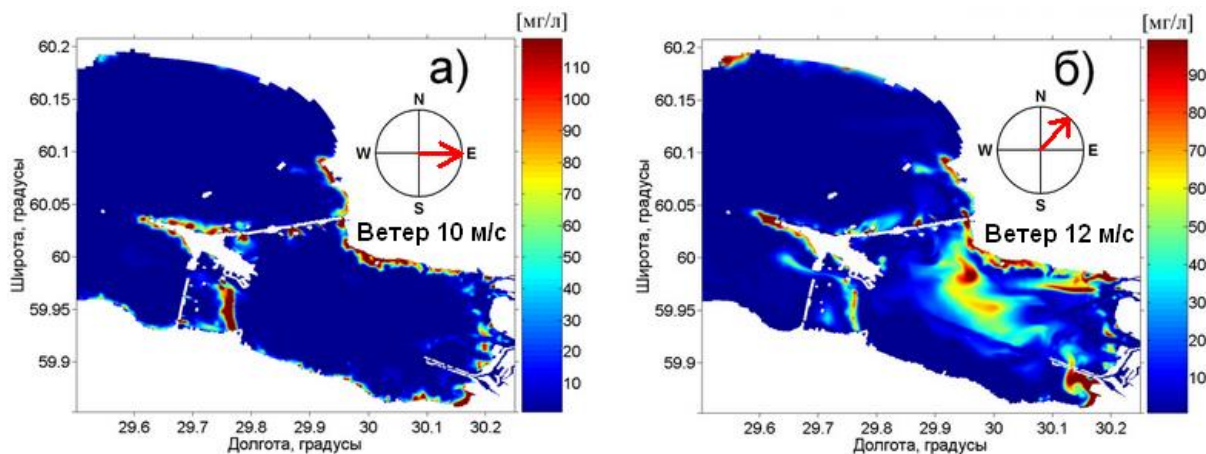


Рисунок 4.2.3 – Пространственное распределение рассчитанной поверхностной концентрации взвешенного вещества, соответствующее моментам времени а) 09.06.2008 16:00; б) 26.10.2008 18:00

Нужно отметить, что взмучивание в точках N и C вызывается преимущественно ветровым волнением, в то время как интенсивность взмучивания в точке L на Ломоносовской отмели сильно зависит не только от ветрового волнения, но значительный вклад вносит и влияние течения. Штормовые нагоны, формирующиеся в Балтийском море и Финском заливе при прохождении циклонов и при сильном ветре, вызывают резкое усиление скорости течения в узкой и мелководной Ломоносовской отмели к югу от острова Котлин, тем самым приводя к интенсивному взмучиванию донных осадков в этом районе. Для подтверждения сказанного на Рисунке 4.2.4 представлено распределение уровня, а стрелками показана скорость и направление течения на нижнем расчетном уровне модели на момент времени 16 часов 9 июня 2008 года.

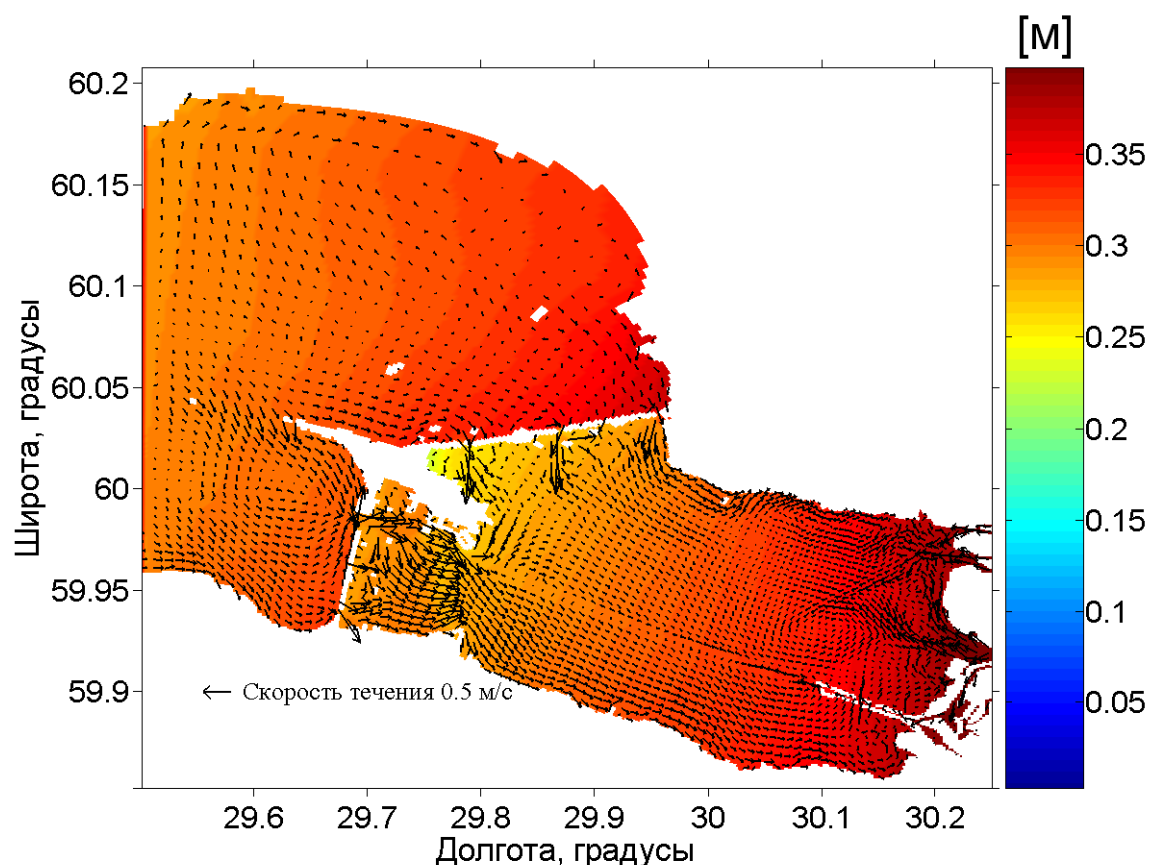


Рисунок 4.2.4 – Рассчитанные уровень, скорость и направление течения на нижнем модельном слое 9 июня 2008 года в 16:00

Вследствие роста уровня на западной границе 9 июня от -13 см в 7 часов до 35 см в 16 часов в Невскую губу поступило значительное количество воды, из-за чего скорости течения в створах и на мелководье возросли. На Ломоносовской отмели скорость на нижнем расчете уровне у дна составляла в момент времени 16:00 в среднем 30–50 см/с. Это еще раз подчеркивает важность учета не только волнения, но и течения при моделировании взмучивания в прибрежных районах.

Результаты расчетов для 2013 года показаны на Рисунке 4.2.5 для тех же трех точек и того же периода с 1 мая по 30 ноября. Сразу обращает на себя внимание тот факт, что в количественном плане абсолютные величины поверхностной концентрации взвеси значительно ниже, чем за тот же период 2008 года вследствие того, что ветровое воздействие было слабее, чем в 2008 году.

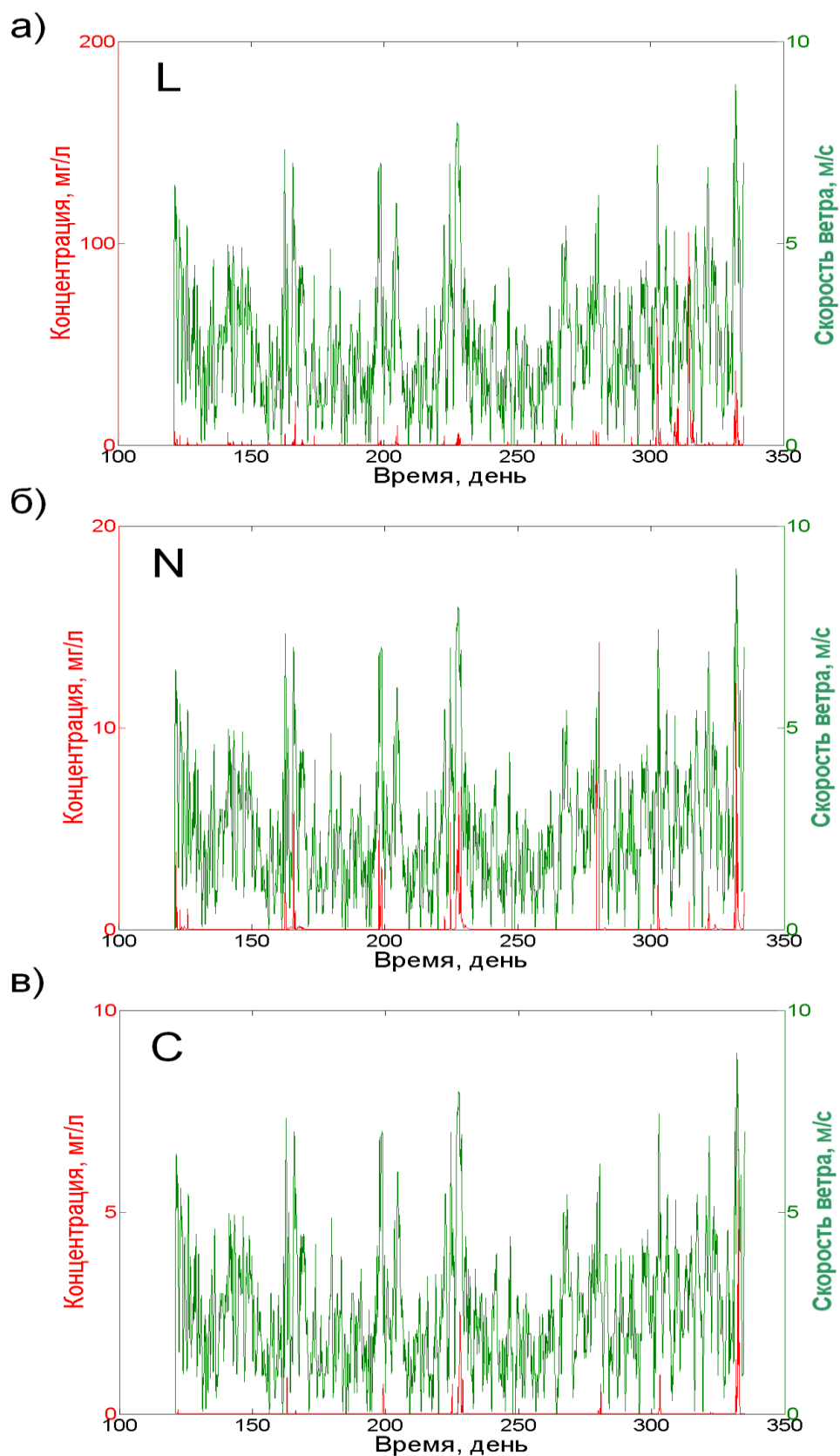


Рисунок 4.2.5 – Временной ход рассчитанной поверхностной концентрации взвешенных частиц (красная кривая) и модуля скорости ветра (зеленая кривая) за период 01.05–30.11 2013 года в трех точках в Невской губе: а) в точке L; б) в точке N; в) в точке C

Помимо анализа временного хода концентрации взвеси в трех точках было оценено и интегральное содержание взвешенного вещества во всей расчетной области, так как представляется, что этот показатель более полно отражает интенсивность взмучивания, нежели поверхностные концентрации в силу того, что зачастую повышенные концентрации взвеси наблюдаются только в придонных слоях, как было показано ранее в третьем разделе. На Рисунке 4.2.6 представлен временной ход рассчитанного суммарного содержания взвешенного вещества с мая по ноябрь для 2008 и 2013 годов.

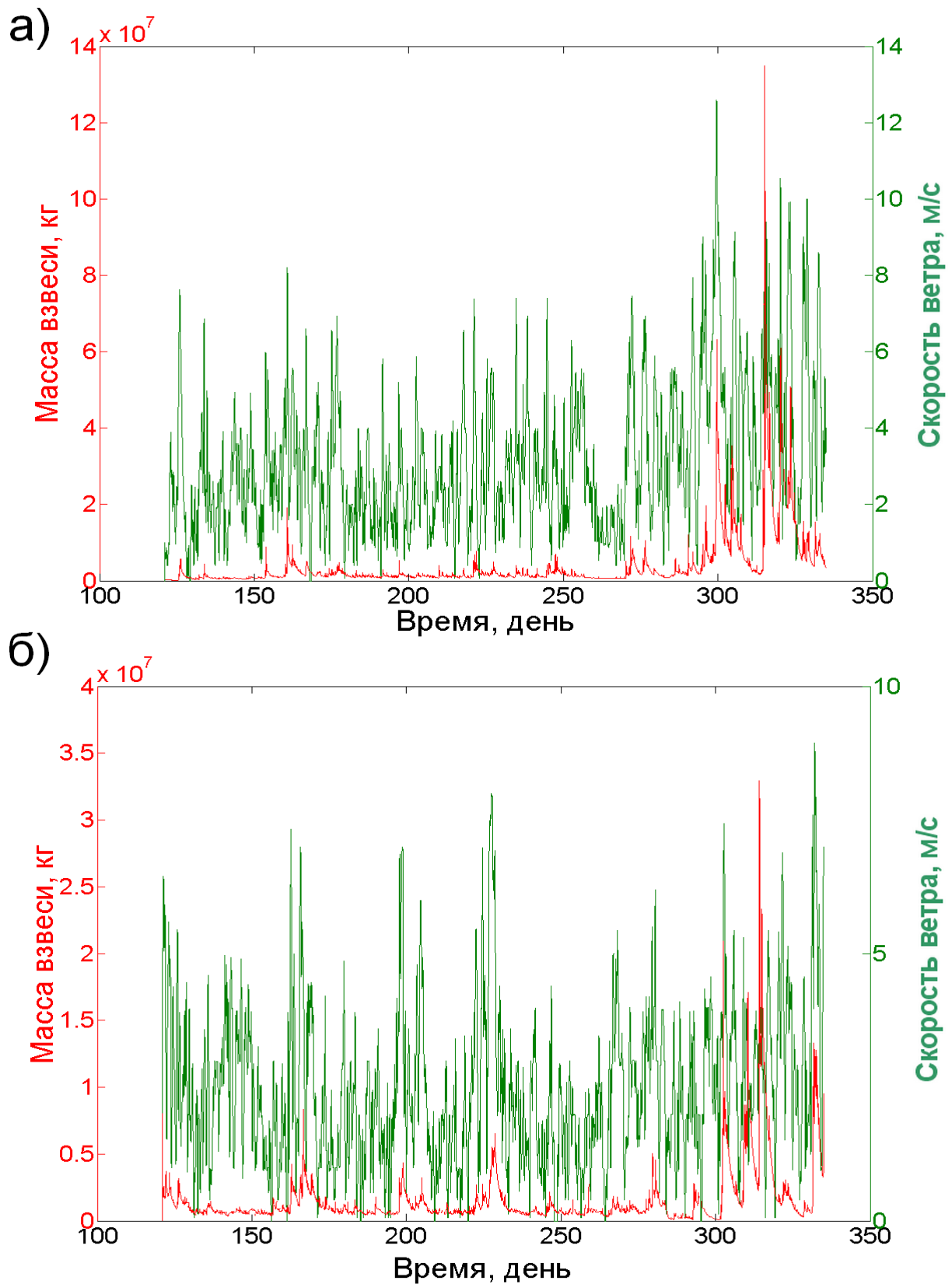


Рисунок 4.2.6 – Временной ход рассчитанного суммарного содержания взвешенного вещества (красная кривая) и модуля скорости ветра (зеленая кривая) в модельной области за период 01.05–30.11 для: а) 2008 года; б) 2013 года

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 одинаковым значениям рассчитанной концентрации или общей массы. Важно то, какое направление имеет ветер, то есть какой разгон в итоге получают ветровые волны, прежде чем достигнут берега. Анализ полученных результатов для 2008 и 2013 годов показывает, что в 2008 году наиболее интенсивно взмучивание происходило вдоль северного и восточного побережья Невской губы при ветрах западного и юго-западного направления. При относительно редких сильных ветрах северного и северо-восточного направления вдоль всего южного берега Невской губы от Санкт-Петербурга до КЗС также наблюдались повышенные концентрации взвеси. В 2013 году по сравнению с 2008 годом чаще наблюдались ветры северного и северо-восточного направления, вследствие чего чаще происходило взмучивания донных осадков вдоль южного берега Невской губы. Вместе с тем наиболее сильные ветры все равно были западных и юго-западных направлений, вызывая интенсивное взмучивание вдоль северного берега губы. Еще раз следует отметить, что помимо воздействия ветровых волн важную роль играет также влияние течения на мелководьях, проявляющееся при значительных колебаниях уровня.

Заключение

В ходе выполнения настоящей работы были получены следующие основные результаты:

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.

Разработанный модельный комплекс для воспроизведения процесса взмучивания донных и переноса взвешенных осадков может быть использован для прибрежной зоны морей с целью определения интенсивности взмучивания в исследуемых районах. 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.

Список сокращений

POM	– Princeton Ocean Model (Принстонская Океаническая Модель)
SWAN	– Simulating Waves Nearshore (Моделирование волн в прибрежной зоне)
WAM	– Wave Model (Модель для воспроизведения ветровых волн)
WAVEWATCH III	– Модель для воспроизведения ветровых волн Национального управления океанических и атмосферных исследований США
ECOMSED	– Трехмерная модель гидродинамики и переноса донных осадков
SEDZL	– Модель взмучивания и переноса донных осадков
TRANSPOR2004	– Модель взмучивания и переноса донных осадков
K3C	– Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений
DATA2	– Эмпирическая формула для расчета среднего за волновой цикл модуля придонного напряжения, генерируемого ветровыми волнами и течением
ФГУНПП «Севморгео»	– Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие по морским геологоразведочным работам «Севморгео»
TSM	– Total Suspended Matter (Суммарное взвешенное вещество)
MODIS	– Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (Спектрорадиометр среднего разрешения, установленный на борту спутников серии Terra (EOS AM-1) и Aqua (EOS PM-1))

Список использованных источников

1. Гидрологические наблюдения на речных станциях и постах Северо-Западного УГМС. Период наблюдений: 2004 г. [Текст]. - Северо-Западное межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2005.
2. Каган, Б.А. Моделирование придонного пограничного слоя в двухфазном осциллирующем потоке [Текст]. / Б.А. Каган, И.А. Неелов // Океанология. - 1994. - № 6. - С. 812-815.
3. Кондратьев, С.А. Формирование ливневых сбросов части неочищенных сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга [Текст] / С.А. Кондратьев, В.А. Рябченко, В.Н. Коноплев, Ш.Р. Поздняков, М.В. Шмакова // Изв. РГО. - 2006. - Т. 138 (4). - С. 47-54.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]: учеб. пособие. Т. VI. - Гидродинамика /Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. 3 изд., перераб. - М.: Наука, 1986. - 736 с.
5. 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. Тематический выпуск «Моделирование водных экосистем». - 2013. - Т. 6, № 4. - С. 32-43.
6. Мартьянов, С.Д. Моделирование процесса взмучивания донных осадков в Невской губе [Текст] / С.Д. Мартьянов, В.А. Рябченко, А.Е. Рыбалко // Ученые записки РГГМУ. - 2011. - № 20. - С. 13-26.
7. Нежиховский, Р.А. Река Нева и Невская губа [Текст]: монография / Р.А. Нежиховский. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 112 с.
8. Некрасов, А.В. Гидрофизические процессы [Текст]. / А.В. Некрасов, Т.Р. Еремина, П.П. Провоторов // Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой. - СПб.: ИНОЗ РАН, 1999. - С. 5-47.
9. Румянцев, В.А. Теоретические и натурные исследования воздействия сточных вод г. Санкт-Петербурга на качество воды в Невской губе [Текст]. / В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев, В.А. Рябченко, Ш.Р. Поздняков, В.Н. Коноплев, Н.В. Игнатьева, А.М. Крючков, С.Г. Каретников // Инженерная экология. - 2005. - № 5. - С. 15-28.

10. Рябченко, В.А. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) [Текст]. / В.А. Рябченко, В.Н. Коноплев, С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков, У.С. Лыскова // Изв. РГО. - 2006. - Т. 138 (5). - С. 48-57.
11. Сервер «Погода России» [Электронный ресурс]. / Лаборатория информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН. - Режим доступа: <http://meteo.infospace.ru/>
12. Сервер «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rp5.ru/>
13. Сервер «OceanColor Web» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
14. Спиридонов, М.А. Воздействие гидротехнических работ на седиментационные процессы в восточной части Финского залива [Текст]. / М.А. Спиридонов, Д.В. Рябчук, Л.Л. Сухачева, В.А. Жамойда, А.Г. Григорьев // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ. - Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2009. - С. 1-9.
15. Усанов, Б.П. Новый удар по Невской губе [Текст] / Б.П. Усанов, С.В. Викторов, Л.Л. Сухачева // Транспорт Российской Федерации. - 2008. - № 3-4 (16-17). - С. 70-74.
16. Усанов, Б.П. Новый удар по Невской губе [Текст] / Б.П. Усанов, С.В. Викторов, Л.Л. Сухачева // Транспорт Российской Федерации. - 2008. - № 5 (18). - С. 60-63.
17. Фрумин, Г.Т. Новый подход к оценке состояния водных объектов (на примере Невской губы) [Текст]. / Г.Т. Фрумин, С.Л. Басова // Экологическая химия. - 2006. - № 16 (1). - С. 1-8.
18. Шишкин, Б.А. Современное состояние экосистемы Невской губы и восточной части Финского залива [Текст] / Б.А. Шишкин // Тр. ГГИ. - 1988. - Вып. 1. - С.89-97.
19. A Primer for ECOMSED, Version 1.3 [Текст]. / Hydroqual, Inc. - Hydroqual, Mahwah, New Jersey, 2002. - 188 p.

20. Adams, C.E. Suspended-sediment transport and benthic boundary layer dynamics [Текст]. / C.E. Adams, G.L. Weatherly // Marine Geology. - 1981. - № 42. - pp. 1-18.
21. Albertson, M.L. Effect of particle shape on the fall velocity of gravel particles [Текст]. / M.L. Albertson // Fifth Hydraul. Conference Proceedings, Iowa Univ. - 1953. - pp. 243-261.
22. Allen, J.R.L. Principles of Physical Sedimentology [Текст]./ J.R.L. Allen. - Blackburn Press, 2001. - 272 p.
23. Allen, M.D. Slip correction measurements of polystyrene and polyvinyl toluene aerosol particles using an improved Millikan apparatus [Текст]: Ph.D Dissertation, Univ. of California, Davis / M.D. Allen. - 1983.
24. Arakawa, A. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model [Текст]. / A. Arakawa, V.R. Lamb // Methods of computational physics. - 1977. - Vol. 17. - pp. 174-265.
25. Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater [Текст]. / UNESCO. - 1980. - UNESCO Technical Papers in Marine Science, 1981, Vol. 38.
26. Bagnold, R.A. An approach to the sediment transport problem for general physics [Текст]. / R.A. Bagnold // Geological survey professional paper 422-I, Washington, D.C. - 1966.
27. Bagnold, R.A. Motion of waves in shallow water: interaction between waves and sand bottoms [Текст]. / R.A. Bagnold // Proc. Roy. Soc. London, 1946. - Ser. A. - pp. 1-15.
28. Blaas, M. Sediment transport modeling on Southern Californian shelves: A ROMS case study [Текст]. / M. Blaas, C. Dong, P. Marchesiello, J.C. McWilliams, K.D. Stolzenbach // Cont. Shelf Res. - 2007. - Vol. 27. - pp. 832-853.
29. Blanchette, F. High-resolution numerical simulations of resuspending gravity currents: Conditions for self-sustainment [Текст]. / F. Blanchette, M. Strauss, E. Meiburg, B. Kneller, M.E. Glinksy // J. Geophys. Res. - 2005. - Vol. 110, C12022. - doi:10.1029/2005JC002927.
30. Blumberg, A.F. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model [Текст]. / A.F. Blumberg, G.L. Mellor // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / edition by N. Heaps. - Washington, D.C. - American Geophysical Union. - 1987. - p. 208.

31. Boczar-Karakiewicz, B. Interaction of internal waves with the seabed on continental shelves [Текст]. / B. Boczar-Karakiewicz, J.L. Bona, B. Pelchat // Cont. Shelf Res. - 1991. - Vol. 11. - pp. 1181-1197.
32. Bogucki, D. Sediment resuspension and mixing by resonantly generated internal solitary waves [Текст]. / D. Bogucki, T. Dickey, L.G. Redekopp // Journal of Physical Oceanography. - 1997. - Vol. 27. - pp. 1181-1196.
33. Booij, N. A third-generation wave model for coastal regions, Part 1. Model description and validation [Текст]. / N. Booij, R.C. Ris, L.H. Holthuijsen // J. Geophys. Res. - 1999. - Vol. 104, No.C4. - pp. 7649-7666.
34. Cacchione, D.A. Nepheloid layers and internal waves over continental shelves and slopes [Текст]. / D.A. Cacchione, D.E. Drake // Geo-Marine Letters. - 1986. - Vol. 6. - pp. 147-152.
35. Cacchione, D.A. Incipient sediment movement by shoaling internal gravity waves [Текст]. / D.A. Cacchione, J.B. Southard // J. Geophys. Res. - 1974. - Vol. 79 (15). pp. 2237-2242.
36. Cardenas, M.P. Sediment Transport Model Validation in Lake Michigan [Текст]. / M.P. Cardenas, D.J. Schwab, B.J. Eadie, N. Hawley, B.M. Lesht // J. Great Lakes Res. - 2005. - Vol. 31. - pp. 373-385.
37. Chu, Y. 2000. Lake Michigan forecast system and the prospects for a sediment transport model [Текст]. / Y. Chu, K. Bedford, D. Welsh // Proc. 6th Internat. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling. American Society of Civil Engineers. - 2000. - pp. 755-764.
38. Colman, S.M. A sediment budget for southern Lake Michigan: Source and sink models for different time intervals [Текст]. / S.M. Colman, D.S. Foster // J. Great Lakes Res. - 1994. - Vol. 20. - pp. 215-228.
39. Costa, R.G. Flow-fine sediment hysteresis in sediment stratified coastal waters [Текст]. / R.G. Costa, A.J. Mehta // Proceedings of the 22nd Coastal Engineering Conference. - Delft. - 1990. - pp. 2047-2060.
40. Davies, A.G. Effects of unsteadiness on the suspended sediment flux in co-linear wave-current flow [Текст]. / A.G. Davies // Cont. Shelf Res. - 1995. - Vol. 15 (8). - pp. 949-979.

41. Davies, A.G. Modeling and measurement of sediment transport by waves in the vortex ripple regime [Текст]. / A.G. Davies, P.D. Thorne // J. Geophys. Res. - 2005. - Vol. 110, C05017. - doi:10.1029/2004JC002468.
42. Dohmen-Janssen, C.M. Mobile-bed effects in oscillatory sheet flow [Текст]. / C.M. Dohmen-Janssen, W.N. Hassan, J.S. Ribberink // J. Geophys. Res. - 2001. - Vol. 106 (C11). - pp. 27103-27115.
43. Eadie, B.J. Sediment trap studies in Lake Michigan: resuspension and chemical fluxes in the southern basin [Текст]. / B.J. Eadie, R.L. Chambers, W.S. Gardner, G.L. Bell // J. Great Lakes Res. - 1984. - Vol. 10 (3). - pp. 307-321.
44. Engelund, F. A criterion for the occurrence of suspended load [Текст]. / F. Engelund // La Houille Blanche. - 1965. - No. 8. - p. 7.
45. Erm, A. The impact of fast ferry traffic on underwater optics and sediment resuspension [Текст]. / A. Erm, T. Soomere // Oceanologia. - 2006. - Vol. 48 (S). - pp. 283-301.
46. Friedrichs, C.T. Resonant internal waves and their role in transport and accumulation of fine sediment in Eckernforde bay, Baltic Sea [Текст]. / C.T. Friedrichs, L.D. Wright // Cont. Shelf Res. - 1995. - Vol. 15 (13). - pp. 1697-1721.
47. Gailani, J. Transport of suspended solids in the lower Fox River [Текст]. / J. Gailani, C.K. Ziegler, W. Lick // J. Great Lakes Res. - 1991. - Vol. 17 (4). - pp. 479-494.
48. Garcia, M.H. Entrainment of bed sediment into suspension [Текст] / M.H. Garcia, G. Parker // J. Hydraul. Eng. - 1991. - Vol. 117. - pp. 414-435.
49. Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description [Текст]: ISO 14688-1:2002. - 2002. - 12 p.
50. Grant, W.D. Combined wave and current interaction with a rough bottom [Текст]. / W.D. Grant, O.S. Madsen // J. Geophys. Res. - 1979. - Vol. 84 (C4). - pp. 1797-1808.
51. Hawley, N. Sediment resuspension in Lake St. Clair [Текст]. / N. Hawley, B.M. Lesht // Limnol. Oceanogr. - 1992. - Vol. 37 (8). - pp. 1720-1737.
52. Hinze, J.O. Turbulence [Текст]. / J.O. Hinze. - New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1975. - pp. 640-645.
53. Horikawa, K. A study on sand movement due to wave action [Текст]. / K. Horikawa, A. Watanabe // Coastal Engrg. Jpn. - 1967. - Vol. 10. - pp. 39-57.

54. Horikawa, K. Sediment transport under sheet flow conditions [Текст]. / K. Horikawa, A. Watanabe, S. Katori // Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering, Cape Town, Reston, VA, USA. - 1982. - pp. 1335-1352.
55. Ji, R. Influences of suspended sediments on the ecosystem in Lake Michigan: a 3-D coupled bio-physical modeling experiment [Текст]. / R. Ji, C. Chen, J.W. Budd, D. Schwab, D. Beletsky, G. Fahnenstiel, T. Johengen, H. Vanderploeg, B. Eadie, J. Cotner, W. Gardner, M. Bundy // Ecological Modelling. - 2002. - Vol. 152. - pp. 169-190.
56. Jonsson, I.G. Wave boundary layers and friction factors [Текст]. / I.G. Jonsson // Proceedings of 10th Conference on Coastal Engineering, Tokyo. - ASCE, New York. - 1966. - pp. 127-148.
57. Klevanny, K.A. Simulation of current and water pollution changes in the Neva Bay after completion of St. Petersburg flood protection barrier [Текст]. / K.A. Klevanny, E.V. Smirnova // Envir. and chem. physics. - 2002. - Vol. 24 (3). - pp. 144-150.
58. Korosov, A.A. Semi-empirical Algorithm for the Retrieval of Ecology-Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments [Текст]. / A.A. Korosov, D.V. Pozdnyakov, A. Folkestad, L.H. Pettersson, K. Sorensen, R. Shuchman // Algorithms. - 2009. - Vol. 2. - No. 1. - pp. 470-497.
59. Krumbein, W.C. The Sediments of Barataria Bay [Текст]. / W.C. Krumbein, E. Aberdeen // Journal of Sedimentary Petrology. - 1937. - Vol. 7 (1). - p.3-17.
60. Krumbein, W.C. Manual of sedimentary petrography [Текст]. / W.C. Krumbein, F.J. Pettijohn. - New York: Appleton-Century-Crofts, 1938. - 548 p.
61. Kurennoy, D. Wind wave conditions in Neva Bay [Текст]. / D. Kurennoy, D. Ryabchuk // Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland). - 2011. - SI 64. - pp. 1438-1442.
62. Lee, C. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan [Текст]. / C. Lee, D.J. Schwab, N. Hawley // J. Geophys. Res. - 2005. - Vol. 110, C03004. - doi:10.1029/2004JC002326. - pp. 1-16.
63. Lesht, B.M. Climatology of sediment transport on Indiana Shoals, Lake Michigan [Текст]. / B.M. Lesht // J. Great Lakes Res. - 1989. - Vol. 15. - pp. 486-497.
64. Li, J. The rule of sediment transport on the Nanhui tidal flat in the Changjiang Estuary [Текст]. / J. Li // Acta Oceanol. Sinica. - 1991. - Vol. 10. - No. 1. - pp.117-127.

65. Li, J. Sediment deposition and resuspension in mouth bar area of the Yangtze Estuary [Текст]. / J. Li, Q. He, L. Zhang, H. Shen // China Ocean Eng. - 2000. - Vol. 14. - No. 3. - pp. 339-348.
66. Liu, Z. Sediment Transport [Текст]. / Z. Liu. - 2 udgave ed. - Aalborg: Aalborg Universitet, 1999. - 74 p.
67. Lou, J. A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan [Текст]. / J. Lou, D.J. Schwab, D. Beletsky, N. Hawley // J. Geophys. Res. - 2000. - Vol. 105. - No. C3. - pp. 6591-6610.
68. Madsen, O.S. Quantitative description of sediment transport by waves [Текст]. / O.S. Madsen, W.D. Grant // Proceedings 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu. - 1976. - pp. 1093-1112.
69. Malarkey, J. A simple model of unsteady sheet-flow sediment transport [Текст]. / J. Malarkey, A.G. Davies, Z. Li // Coastal Engineering. - 2003. - Vol. 48 (3). - pp. 171-188.
70. McNown, J. S. Sediment concentration and fall velocity [Текст]. / J.S. McNown, P.N. Lin // Proc. 2nd Mid Western Conf. on Fluid Mechanics, Ohio State Univ. - 1952. - pp. 401-411.
71. Mellor, G.L. Users guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model [Электронный ресурс]. / G.L. Mellor. - Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton, NJ. - 2004. - 56 p. - Режим доступа: <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB/publications.htm>
72. Mellor, G.L. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [Текст]. / G.L. Mellor, T. Yamada // Rev. Geophys. Space Phys. - 1982. - Vol. 20. - No. 4. - pp. 851-875.
73. Miller, M.C. Threshold of sediment motion under unidirectional current [Текст]. / M.C. Miller, I.N. McCave, P.D. Komar // Sedimentology. - 1977. Vol. 24. - pp. 507-527.
74. Molchanov, M. Modeling of suspended matter transport in the Neva Bay and the Eastern part of the Gulf of Finland [Текст]. / M. Molchanov, T. Eremina, I. Neelov // Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics of coastal zone of non-tidal seas, Baltiysk. - 2010. - pp. 207-211.
75. Nittrouer, C.A. Transport of particles across continental shelves [Текст]. / C.A. Nittrouer, L.D. Wright // Reviews of Geophysics. - 1994. - Vol. 32 (1). - pp. 85-113.

76. NOGAT Offshore Pipeline [Текст]: report on erodibility tests. - Rep. No. H1050. - The Netherlands, Delft: Delft Hydraulics, 1989. - 32 p.
77. Oliver, D.R. The sediment suspension of closely-spaced spherical particles [Текст]. / D.R. Oliver // Chem. Eng. Sci. - 1961. - Vol. 15. - pp. 230-242.
78. Orlanski, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows [Текст]. / I. Orlanski // Journal Computational Physics. - 1976. - Vol. 21. - pp. 251-269.
79. Parkinson, C.L. A large-scale numerical model of sea ice [Текст]. / C.L. Parkinson, W.M. Washington // J. Geophys. Res. - 1979. - Vol. 84 (C1). - pp. 311-337.
80. Pleskachevsky, A. Modeling of suspended particulate matter transport in coastal areas [Текст]. / A. Pleskachevsky, H. Gunther // Proc. US/EU-Baltic International Symposium, IEEE/OES, 2008. - pp. 1-8.
81. Pneumatic conveying of solids [Текст] / R.D. Marcus, L.S. Leung, G.E. Klinzing, F. Rizk. - Powder Technology Series, 1990. - 575 p.
82. Ribbe, J. A model of suspended sediment transport by internal tides [Текст]. / J. Ribbe, P.E. Holloway // Cont. Shelf Res. - 2001. - Vol. 21 (4). - pp 395-422.
83. Richardson, J.F. Sedimentation and fluidization: Part I [Текст]. / J.F. Richardson, W.N. Zaki // Trans. Inst. Chem. Eng. - 1954. - Vol. 32. - pp. 35-50.
84. Richardson, J.F. Sedimentation and fluidization: Part II [Текст]. / J.F. Richardson, R.A. Meikle // Trans. Inst. Chem. Eng. - 1961. - Vol. 39. - pp. 348-356.
85. Ris, R.C. A third-generation wave model for coastal regions, Part 2. Verification [Текст]. / R.C. Ris, L.H. Holthuijsen, N. Booij // J. Geophys. Res. - 1999. - Vol. 104. - No. C4. - pp. 7667-7681.
86. Roberts, J. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles [Текст]. / J. Roberts, R. Jepsen, D. Gotthard, W. Lick // J. Hydraul. Eng. - 1998. - Vol. 124 (12). - pp. 1261-1267.
87. Rogers, W.E. Improving the numerics of a third-generation wave action model [Текст]. / W.E. Rogers, J.M. Kaihatu, N. Booij, L. Holthuijsen. - Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, 1999. - 84 p.
88. Ryabchenko, V. Modelling ice conditions in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea [Текст]. / V. Ryabchenko, A. Dvornikov, J. Haapala, K. Myrberg // Cont. Shelf Res. - 2010. - Vol. 30. - pp. 1458-1471.

89. Ryabchuk, D. Coastal erosion processes in the eastern Gulf of Finland and their links with geological and hydrometeorological factors [Текст]. / D. Ryabchuk, A. Kolesov, B. Chubarenko, M. Spiridonov, D. Kurennoy, T. Soomere // *Boreal Env. Res.* - 2011. - Vol. 16 (suppl. A). - pp 117-137.

90. Scheffer, M. Fish facilitate wave resuspension of sediment / M. Scheffer, R. Portielje, L. Zambrano // *Limnol. Oceanogr.* - 2003. - Vol 48 (5). - pp. 1920-1926.

91. Schneider, A. Episodic particle transport events controlling PAH and PCB cycling in Grand Traverse Bay, Lake Michigan [Текст]. / A. Schneider, B. Eadie, J. Baker // *Environ. Sci. Technol.* - 2002. - Vol. 36 (6). - pp. 1181-1190.

92. Schwab, D.J. Climatology of large sediment resuspension events in southern Lake Michigan [Текст]. / D.J. Schwab, B.J. Eadie, R.A. Assel, P.J. Roebber // *J. Great Lakes Res.* - 2006. - Vol. 32. - pp.50-62.

93. Shi, Z. Controls on effective settling velocities of mud flocs in the Changjiang Estuary, China [Текст]. / Z. Shi, H.J. Zhou // *Hydrolog. Process.* - 2004. - Vol. 18. - pp. 2877-2892.

94. Shields, A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung [Текст]. / A. Shields. - Berlin, 1936. - Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. - 26 p. (English translation by W. P. Ott, J. C. van Uchelen. - U.S. Dep. of Agric. Soil Conser. Serv. Coop. Lab., Calif., Inst. of Technol., Pasadena. - 1936. - 36 p.).

95. Sipelgas, L. A bio-optical model for the calculation of suspended matter concentration from MODIS data in the Pakri Bay, the Gulf of Finland [Текст]. / L. Sipelgas, V. Ossipova, U. Raudsepp, A. Lindfors // *Boreal Env. Res.* - 2009. - Vol. 14. - pp. 415-426.

96. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment [Текст]. / J. Smagorinsky // *Mon. Weather Rev.* - 1963. - Vol. 91. - pp. 99-164.

97. Soomere, T. Fast ferry traffic as a qualitatively new forcing factor of environmental processes in non-tidal sea areas: A case study in Tallinn Bay, Baltic Sea [Текст]. / T. Soomere // *Environ. Fluid Mech.* - 2005. - Vol. 5 (4). - pp. 293-323.

98. Soulsby, R.L. Bed shear-stresses due to combined waves and currents [Текст]. / R.L. Soulsby // *Advances in coastal morphodynamics* / M.J.F. Stive, H.J. De Vriend, J.

Fredsoe, L. Hamm, R.L. Soulsby, C. Teisson, J.C. Winterwerp. - Delft, NL: Delft Hydraulics, 1995. - pp. 4-20 – 4-23.

99. Soulsby, R.L. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications [Текст]. / R.L. Soulsby. - London: Tomas Telford Services, 1997. - 253 p.

100. Soulsby, R.L. Bed shear stresses under combined waves and currents on smooth and rough beds [Текст]. / R.L. Soulsby, S. Clarke. - Report TR 137, HR Wallingford, 2005. - 52 p.

101. The WAM model – A third generation ocean wave prediction model [Текст]. / WAMDI Group // J. Phys. Oceanogr. - 1988. - Vol. 18 (12). - pp. 1775-1810.

102. Thorn, M.F.C. Physical processes of siltation in tidal channels [Текст]. / M.F.C. Thorn // Proc. Hydraulic Modeling of Maritime Engineering Problems, Institution of Civil Engineers, London, 1981. - pp. 47-55.

103. Thorne, P.D. Observations and analysis of sediment diffusivity profiles over sandy rippled beds under waves [Текст]. / P.D. Thorne, A.G. Davies, P.S. Bell // J. Geophys. Res. - 2009. - Vol. 114, C02023. - pp. 1-16. - doi:10.1029/2008JC004944.

104. Thorne, P.D. Measurements of near-bed intra-wave sediment entrainment above vortex ripples [Текст]. / P.D. Thorne, A.G. Davies, J.J. Williams // Geophys. Res. Lett. - 2003. - Vol. 30 (20). - 2028. - pp. 1-4. - doi:10.1029/2003GL018427.

105. Tolman, H.L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents [Текст]. / H.L. Tolman // J. Phys. Oceanogr. - 1991. - Vol. 21 (6). - pp. 782-797.

106. van Rijn, L.C. Computation of bed-load and suspended load [Текст]. / L.C. van Rijn. Rep. S487-II. - Delft Hydraul. Lab., Delft, Netherlands, 1982.

107. van Rijn, L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas [Текст]. / L.C. van Rijn. - Amsterdam: Aqua Publications, 1993. - 690 p.

108. van Rijn, L.C. Sediment transport by currents and waves [Текст]. / L.C. van Rijn. - Rep. H461. - Delft Hydraul. Lab., Delft, Netherlands, 1989.

109. van Rijn, L.C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport [Текст]. / L.C. van Rijn // J. Hydraul. Eng. - 1984. - Vol. 110. - No. 11. - pp. 1613-1641.

110. van Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport [Текст]. / L.C. van Rijn // J. Hydraul. Eng. - 2007. - Vol. 133. - No. 6. - pp. 649-667.

111. van Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport [Текст]. / L.C. van Rijn // J. Hydraul. Eng. - 2007. - Vol. 133. - No. 6. - pp. 668-689.
112. van Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds [Текст]. / L.C. van Rijn // J. Hydraul. Eng. - 2007. - Vol. 133. - No. 7. - pp. 761-775.
113. van Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. IV: Application of morphodynamic model [Текст]. / L.C. van Rijn, D.-J. R. Walstra, M. van Ormondt // J. Hydraul. Eng. - 2007. - Vol. 133. - No. 7. - pp. 776-793.
114. Vincent, G.E. Contribution to the study of sediment transport on a horizontal bed due to wave action [Текст]. / G.E. Vincent // Proc. 6th Conf. Coastal Eng. - 1958. - pp. 326-355.
115. Vinzon, S.B. A preliminary examination of Amazon shelf sediment dynamics [Текст]: Engineer Degree Thesis / S.B. Vinzon. - University of Florida, Gainesville, 1998. - 168 p.
116. Vinzon, S.B. Boundary layer effects due to suspended sediment in the Amazon estuary [Текст]. / S.B. Vinzon, A.J. Mehta // Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes / W.H. McAnally, A.J. Mehta. - Amsterdam: Elsevier, 2001. - pp. 359-372.
117. Vinzon, S.B. Lutoclines in high concentration estuaries: Some observations at the mouth of the Amazon [Текст]. / S.B. Vinzon, A.J. Mehta // J. Coastal Res. - 2003. - Vol. 19. - No. 2. - pp. 243-253.
118. Wentworth, C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments [Текст]. / C.K. Wentworth // The Journal of Geology. - 1922. - Vol. 30. - No. 5. p. 377-392.
119. Winterwerp, J.C. On the dynamics of high-concentrated mud suspensions [Текст]: Doctoral thesis / J.C. Winterwerp. - The Netherlands, Delft: Delft University of Technology, 1999. - 190 p.
120. Winterwerp, J.C. Rapid siltation from saturated mud suspensions [Текст]. / J.C. Winterwerp, R.E. Uittenbogaard, J.M. De Kok // Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes / W.H. McAnally, A.J. Mehta. - Amsterdam: Elsevier, 2001. - pp. 125-146.
121. Wood, D.J. The SWAN model used to study wave evolution in a flume [Текст]. / D.J. Wood, M. Muttray, H. Oumeraci // Ocean Engineering. - 2001. - Vol. 28. - pp. 805-823.

122. Zanke, U. Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten [Текст]. / U. Zanke. - Technical University, Hannover, West Deutschland: Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau, 1977. - Heft 46. - Seite 243.