

ОТЗЫВ

официального оппонента

Гриценко Владимира Алексеевича

на диссертацию Мартьянова Станислава Дмитриевича «МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ОЦЕНКА ВЗМУЧИВАНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ

В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ МОРЕЙ НА ПРИМЕРЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология

Хорошо известна значимость процессов переноса, взвешивания, осаждения и переотложения взвешенных в воде твердых частиц различной природы. Особенно они важны для прибрежных зон морей и океанов, где изменчивость рельефа дна и берегов может оказывать отрицательное воздействие на самые разные грани существования природных и социально-экономических систем. Несмотря на значительные усилия проблемы описания, а тем более - прогнозирования природных процессов в зоне контакта суши и воды, все еще далеки от своего решения.

Диссертационное исследование Станислава Дмитриевича Мартьянова *посвящено* разработке модельного комплекса циркуляции вод с учетом процессов взмучивания донных осадков и ее последующим применением для анализа седиментогенеза в прибрежном районе моря на примере Невской губы. В условиях расширяющейся хозяйственной деятельности в прибрежных зонах, например, Балтики, в виде добычи песка и дампинга отходов, *актуальность выбранной темы* диссертационного исследования очевидна и сомнений не вызывает.

Основная цель работы - комплексное исследование движения вод и транспорта взвешенного материала в Невской губе. Использование численной модели как основного инструмента исследования, способного при разумных затратах обеспечить не только улучшение понимания происходящих в конкретной акватории процессов, но и выполнить их классификацию и предложить физически корректный прогноз развития событий, вполне оправдано и мотивировано. Реализованный в работе подход построения сложной модели позволяет, при необходимости, использовать построенный оригинальный модуль поведения взвешенного в воде материала и для других базовых гидродинамических моделей.

Для достижения поставленной *цели* автором были *решены задачи*:

- (*) выбора способа описания поведения донных осадков в модели,
- (*) калибровки модели взмучивания,
- (*) разработки трехмерной гидротермодинамической модели Невской губы с учетом взмучивания и переноса двух типов донных осадков,

(*) проведения серии расчетов циркуляции вод в Невской губе и восточной части Финского залива с учетом процессов взмучивания донных осадков и последующего анализа модельных расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Решение поставленных задач автором последовательно описывается в четырех главах.

В **Главе 1 - «Современное состояние исследований процесса взмучивания донных осадков и основные подходы к его математическому моделированию»** - описывается современное состояние исследований процесса взмучивания донных осадков и приводится краткий аналитический обзор основных подходов к его математическому моделированию.

В **разделе 1.1** описываются основные физические механизмы взмучивания донных осадков и приводится анализ некоторых моделей и подходов к параметризации поступления взвеси со дна.

В **разделе 1.2** рассматривается процесс гравитационного оседания взвешенных частиц. Отмечается структурно-функциональная сложность этого процесса и важность учета взаимодействия оседании множества частиц друг с другом и уменьшения, в результате, скорости их оседания. Показана также необходимость учета флокуляции, или слипания мелких взвешенных частиц.

В **разделе 1.3** обсуждается влияние наличия в воде взвешенных частиц на изменение общей плотностной стратификации, что порождает изменения в поле течений и интенсивности турбулентного перемешивания.

Итогом раздела, кроме собственно аналитического обзора, стала формулировка необходимых физических граней процесса взаимодействия взвешенного материала и воды.

Глава 2 - «Модель циркуляции моря и ее модификация для учета процесса взмучивания» - посвящена описанию основного, авторского инструмента исследования - модельного комплекса для воспроизведения взмучивания и переноса взвешенных частиц донных осадков.

В **разделе 2.1** дается краткая аннотация базовой модели общей циркуляции океана Принстонского университета, использующей σ -координаты, учитывающей коэффициенты вертикального турбулентного обмена по модели Меллора-Ямады уровня 2.5, а горизонтального - по формуле Смагоринского.

В **разделах 2.2 и 2.3** описываются процесс построения оригинальной модели взмучивания донных осадков, в основе которой - адвективно-диффузионное уравнение для концентрации взвеси и решаемое отдельно для каждой фракции взвешенных частиц, и методика расчета суммарного придонного напряжения.

Подробно описываются процедуры постановки расчетных условий на границах водоема. Особое внимание уделено процедурам расчета верти-

кального движения частиц. В модели дополнительно предусмотрено введение поправочных коэффициентов на затрудненное оседание и возможность флокуляции. Столь же тщательно спроектированы процедуры вычисления критического придонного напряжения с учетом возможных эффектов когезии и уплотненности донных осадков. Реализован также учет влияния плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию, т.е. явно реализован механизм обратной связи воздействия поля взвеси на динамику вод.

В разделе 2.4 дается краткое описание модели ветрового волнения SWAN, условия расчетов на ней и используемые выходные данные модели: высоты значительных волн, период волн, максимальные придонные волновые орбитальные скорости и направления распространения волн за каждый час.

Основной итог этой главы - построение оригинального программного комплекса для моделирования движения вод с учетом взвешивания и переноса донных осадков без привязки к конкретному водоему.

В **Главе 3 - «Результаты моделирования взмучивания донных осадков в Невской губе»** - приводятся результаты моделирования взмучивания донных осадков в Невской губе. Здесь приведено, фактически, основное содержание работы. Следует отметить, что моделирование динамики вод и с учетом взмучивания донных осадков и их переноса в Невской губе проводится впервые.

В **разделе 3.1.** дается краткое физико-географическое описание объекта исследования.

Хорошо известно, что Невская губа находится в условиях значительного антропогенного воздействия, и поэтому для корректной оценки естественного взмучивания донных осадков важен выбор периода времени с минимальным уровнем техногенного влияния на поле взвеси. Решение именно этой задачи было получено в **разделе 3.2.** Наиболее подходящим стал 2004 год в течение которого интенсивных гидротехнических работ в Невской губе не проводилось и период времени с 19 мая по 16 июня, полностью обеспеченный экспериментальными данными для задания начальных и граничных условий, а также спутниковыми снимками для калибровки и валидации модели.

В **разделе 3.3** представлены полученные на модели SWAN результаты расчетов интенсивности ветрового волнения в Невской губе. Одним из достоинств модели SWAN является автоматический учет в ней длины разгона волн. Сравнение с наблюдениями 1959–1962 гг показало, что 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. Т.о., выбор модели SWAN обеспечил авторский модельный комплекс процедурой расчета поля ветрового волнения необходимого качества.

В **разделе 3.4** приводятся результаты расчета поля придонных напряжений. Очевидно, что придонное сдвиговое напряжение играет ключевую роль в интенсивности процесса взмучивания и при его моделировании учет ветрового волнения особенно важен в прибрежных мелководных районах, где вклад волнения часто преобладает. Очевидно также, что при наличии в акватории такой реки как Нева влиянием течений пренебрегать нельзя.

Материалы экспериментальных исследований, положенные в основу диссертационного исследования, представляется достаточным по объему и качеству. Приведенные на рисунках этого раздела рассчитанные пространственные распределения придонных напряжений показывают значительную степень пространственной дифференциации величин напряжений, порождаемых динамикой вод и ветровым волнением, а также суммарного придонного напряжения. Особенно велика степень неоднородности при переходе от сильного ветра к слабому или наоборот.

Результаты расчетов хорошо иллюстрированы, что помогает лучше понять структурные различия в механизмах генерации напряжений на дне и итог их воздействия на донные осадки и поле взвеси в водах Невской губы.

Полученные результаты, в частности, убедительно подтвердили правильность учета в модели обоих факторов при воспроизведении взмучивания донных осадков.

Раздел 3.5 посвящен анализу влияния особенностей пространственного распределения типов донных осадков на эволюции поля взвеси. Целесообразность выделения районов с преобладанием какой-либо фракции частиц были подтверждены результатами численных экспериментов. Удалось, в частности, показать не только разницу в интенсивности взмучивания для разных типов осадков при сильном внешнем воздействии, но и разницу в дальнейшем развитии процесса после его прекращения. Расчеты показали также оправданность использованного в работе предположения о двухфракционном составе донных осадков. Отметим, что для каждой из этих фракций в модели эволюционное уравнение решается отдельно.

Основным результатом **раздела 3.6** стала констатация необходимости учета влияния плотности взвешенных в воде частиц на плотностную стратификацию при расчетах для корректного воспроизведения всех гидрологических характеристик.

В **разделе 3.7** выполнена оценка чувствительности модели взмучивания к выбору значений коэффициента когезии для илистых донных осадков и доли глинистого материала в донных осадках. Показано, что модель крайне чувствительна к изменению значений этих коэффициентов, конкретный выбор которых был сделан на основе сравнения расчетов с данными спутниковых измерений.

В **разделе 3.8** выполнены и описаны результаты калибровки и валидации модели. Очевидна необходимость и важность содержания данного пункта для всего исследования. При верификации модели были использованы сравнения по полям суммарной концентрации взвешенного вещества TSM (Total Suspended Matter, MODIS, Aqua), когезии, поверхностной концентрации взвешенных частиц, фоновой концентрацией взвеси. Для проверки влияния речного стока на итоговое поле концентрации взвеси в модель дополнительно была добавлена третья фракция частиц. Данная деталь хорошо иллюстрирует гибкость предложенного в работе подхода к построению сложного программного комплекса.

В данной главе автору удалось обнаружить и убедительно продемонстрировать пространственные особенности взвешивания донных осадков в акватории Невской губы. Здесь же на примере конкретной акватории полностью подтверждена верность физических предпосылок, заложенных в модуль учета взвеси, предложенный во второй главе.

В **Главе 4 - «Временная изменчивость взмучивания в Невской губе в безледный период»** - приводятся результаты модельных расчетов по взмучиванию донных осадков в Невской губе для длительных безледных периодов 2008 и 2013 годов.

Ветровое волнение играет главную роль во взмучивании донных осадков в прибрежных районах, где приливные колебания малы. В **разделе 4.1** описана процедура выбора временного периода для оценки интенсивности взмучивания в Невской губе на длительных временных отрезках с сильными и слабыми или умеренными ветрами для безледного периода с 1 мая по 30 ноября.

В **разделе 4.2** описано исследование сезонных изменений концентрации взвешенного вещества в 2008 и 2013 гг. Проведенные расчеты показали, что повышенные поверхностные концентрации взмученного осадочного вещества наблюдались в Невской губе с конца сентября до конца ноября, что объясняется сильными ветрами западных и юго-западных направлений со скоростью выше 8 м/с. Расчеты показали также, что в процессах взмучивания в разных выбранных для сравнения точках доминируют разные факторы: ветровое волнение или влияние течения. Каждый из результатов главы проиллюстрирован наглядными рисунками.

Итогом главы стали оценка степени доминирования каждого из двух факторов взвешивания донных осадков для выбранных контрольных точек, а также констатация важности не только силы ветра и его направления, но и длина разгона и фоновое течение.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы. К наиболее интересным из них следует отнести разработку модуля взмучивания донных и

переноса взвешенных осадков. Предложенный автором подход физически содержателен и 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 в воде частиц на общую плотностную стратификацию.

К достижениям автора следует отнести рассчитанные на модели карты суммарного придонного сдвигового напряжения в Невской губе для различных метеорологических ситуаций. Серии расчетов позволили наглядно показать структурно-функциональные различия воздействия придонных напряжений от течений и ветрового волнения на донные осадки в Невской губе.

Более чем интересно и важно доказательство необходимости учета в модели не менее чем двух фракций донных осадков (песков и илов, а при необходимости - и третьего вида) с соответствующим пространственным распределением для корректного воспроизведения эволюции поля концентрации взвеси.

Особо следует отметить выполненную в работе географическую привязку пространственной неоднородности взмучивания донных осадков для безледных периодов 2004, 2008 и 2013 годов.

В целом содержание диссертации убеждает в том, что предложенный автором модельный комплекс действительно является эффективным инструментом комплексного изучения динамики вод Невской губы с учетом взвешивания и переноса донных осадков.

Авторская модель позволила выполнить расчеты концентрации взмученного донного вещества для разных типов донных осадков в Невской губе с учетом нелинейных взаимодействий придонных напряжений, генерируемых ветровыми волнами и течением, учитывающей сцепление частиц донных осадков, переменную скорость оседания взвеси, а также влияние плотности взвешенных частиц на общую плотностную стратификацию. Убедительно обоснована необходимость учета в модели данных факторов для корректного воспроизведения эволюции поля взвешенных частиц в Невской губе. Впервые получены оценки пространственного распределения и периодов интенсивного взмучивания в Невской губе годовом цикле.

Потенциально, разработанный модельный комплекс может использоваться для определения интенсивности взмучивания в исследуемых районах морей и оценок переноса других примесей, что особенно важно для экологических задач. Возможность увеличения количества типов взвеси, практически реализованная для учета поступления взвеси от речного стока, безусловное

достоинство модели, наглядно демонстрирующая ее незамкнутость. Т.о., работа имеет вполне определенную **практическую значимость**.

Все основные выводы диссертации являются новыми, полностью обоснованными ее содержанием и хорошо иллюстрированы. В диссертации решены все поставленные задачи; сформулированная автором цель исследования представляется достигнутой.

Вынесенные на защиту положения характеризуются новизной и достоверностью и отражают основные достижения диссертационной работы.

В структурном отношении диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, ее объем составляет 106 страниц, включая 33 рисунка и 2 таблицы, список литературы содержит 122 наименования, в том числе более 100 которых англоязычна.

Автореферат структурно и содержательно адекватен рукописи диссертационного исследования.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 2 статьи в журналах из списка ВАК. Список использованной литературы по большей части состоит из современных иностранных источников, что подчеркивает знакомство автора с современным и признанным научно-методологическим уровнем такого рода исследований.

Основные результаты работы **прошли необходимую апробацию** на российских и международных семинарах и конференциях.

Автором непосредственно выполнена работа по существенному расширению возможностей известной 3D-модели циркуляции Невской губы для расчета поступления со дна, переноса и переотложения взвешенного вещества. Для расчета характеристик ветрового волнения в акватории Невской губы в авторский модельный комплекс встроена модель SWAN. Выполнена настройка и калибровка модельного комплекса, оценена ее чувствительность к выбору значений основных параметров модели.

Вопросы и замечания по диссертации

1. Предложенный в рукописи стиль изложения результатов исследования в фокусе которого - необходимость решения сформулированных задач - в полной мере проявился и в предложенном обзоре. В центре обзора - современные результаты, полученные с использованием современных измерительных и расчетных технологий. Данное обстоятельство может облегчить, наверное, внешнее признание модели и подхода в целом, и повышает возможность ее практической реализации для решения задач движения вод и переноса взвеси в Невской губе. По-видимому, эта же концентрация на вполне конкретных физических аспектах решаемых задач позволила не включить в обзор монографии Б.Самолюбова (2007), Р. Косьяна и М.Крыленко (2011).

2. Глава 1 (как и все остальные) почему-то не заканчивается выводами с формулировкой основных полученных результатов. Да - обзор современных результатов выполнен, да - очерчены грани будущих авторских исследований, да - показана многогранность природных процессов движения взвешенного в воде материала. И все это бесспорно важно. Но если нет выводов, важных для последующих исследований, то зачем эта глава? Наконец, именно анализ уже выполненных исследований позволил успешно решить задачу оптимального выбора описания поведения донных осадков в модели и обеспечить получение одного из основных результатов работы. Неявно или контекстуально, формулировки, конечно, угадываются и, местами, присутствуют. Но цельность и стройность работы от появления явных итогов глав, бесспорно, выиграла бы.

3. Используемая в работе РОМ-модель действительно известна и широко используется в океанологических исследованиях. Однако, изначально, она проектировалась для решения типичных океанологических задач с изменчивостью полей, линейные и временные масштабы которых существенно больше выбранной для моделирования акватории. Однако, объяснение возможности использования РОМ-модели для акватории Невской губ, отсутствует или говоря другим языком - теорема существования решений не обсуждается. Особенно важен поставленный вопрос для моделей турбулентности, поскольку все схемы замыкания так или иначе используют и зависят от масштабов задачи. Из общих соображений понятно, что модель, по-видимому, вполне пригодная для решения рассматриваемых в диссертации задач, однако, соответствующий пункт был бы желателен.

4. Выводы по второй главе также отсутствуют, а ведь ее итогом является построение основного инструмента исследования. Из текста данной главы также неясен механизм или процедура учета добавочной плотности воды за счет присутствия взвеси в функционировании всей модели в целом. Необходимые уравнения и формулы не приведены.

Отсутствуют также и дискретные формулы для модуля переноса взвеси. Данный модуль является оригинальным и вариант выбора формы расчетных условий на границах модельного пространства должен был приведен.

5. В работе не приведена структурная схема численных экспериментов: взаимно увязка натурных данных, используемых для задания расчетных условий на границах модельного пространства, ветер и свободные границы и т.п., все эти детали проведения расчетов должны быть обозначены явно.

Все перечисленные замечания не касаются совокупности всех основных достижений работы и не снижают общего благоприятного впечатления от диссертационного исследования, а также не ставят под вопрос ее завершенность и касаются лишь отдельных граней процессов решения поставленных в работе задач.

Заключение официального оппонента.

Диссертационная работа Мартьянов Станислав Дмитриевич «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВЗМУЧИВАНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ МОРЕЙ НА ПРИМЕРЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, содержащую новые сведения о процессах взвешивания и переноса донных осадков в Невской губе.

Результаты диссертационной работы прошли необходимую апробацию на научных семинарах и конференциях. Основные результаты работы опубликованы в 2 статьях в журналах из перечня ВАК и 5 - в других журналах. Содержание работы по своей тематике соответствует специальности 25.00.28 – Океанология в перечне специальностей, утвержденном ВАК.

Считаю, что работа выполнена на актуальную тему и на высоком научном уровне, представляет научный и практический интерес, полностью соответствует требованиям внутреннего единства, новизны результатов, взаимосвязанности и обоснованности выводов, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, а ее автор - Мартьянов Станислав Дмитриевич – заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры географии океана

Институт природопользования, территориального развития и градостроительства
Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта,

Почтовый адрес: 236041, г. Калининград, ул. А.Невского, 14,

Телефон. 8 4012 953086, e-mail: VGritsenko@kantiana.ru,

17.02.2015г.



Владимир Алексеевич Гриценко

Подпись *Гриценко Владимира Алексеевича* **заверяю**

Проректор по научной работе

Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта

доктор физико-математических наук, профессор



Артем Валерьянович Юров