

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гусева О.И. «Численные алгоритмы для расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионных моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы исследований.

Представленная диссертационная работа посвящена исследованию методами математического моделирования волн цунами оползневого и сейсмического происхождения с использованием нелинейно-дисперсионных (НЛД-) моделей мелкой воды.

Актуальность исследования цунами обуславливается большой численностью населения, проживающего на берегах океанов и внутренних водоёмов, а также строительством высокотехнологичных объектов (АЭС, верфи и т.д.). При помощи математического моделирования этих катастрофических явлений решаются такие важные задачи, как исследование потенциально возможных цунами, цунамирайонирование, оперативный прогноз и др.

Большая часть работ по моделированию цунами выполняется в рамках классической модели мелкой воды, не воспроизводящей частотную дисперсию волн. Такой выбор оправдан для большого круга задач, так как длина волн цунами может составлять сотни километров, в то время как средняя глубина океана – около 4 км. Тем не менее, уже около полувека (с работ *Перегрина 1966 и 1967*) активно развиваются НЛД -модели и численные алгоритмы для их решения. Важность учёта дисперсионных эффектов до сих пор обсуждается исследователями (см., например, *Glimsdal et al. 2013*), и, как правило, отмечается в задачах об оползневых и трансокеанических цунами. При моделировании последних необходимо учитывать сферичность Земли, так как длительное распространение волн по поверхности сферы может увеличивать их амплитуду в несколько раз по сравнению с плоским (плановым) случаем.

НЛД-модели в сферических координатах появились относительно недавно, при этом в численных реализациях отбрасывались все нелинейно-дисперсионные слагаемые и не учитывалась возможность подвижности дна. В данной диссертационной работе предлагается численный алгоритм для полностью нелинейной дисперсионной (полной НЛД-) модели (*Федотовой и*

Хакимянова 2010), учитывающей эффекты нелинейности и дисперсии, подвижности дна, сферичности и вращения Земли. Модель применяется в ряде идеализированных и реалистичных задач об оползневых и сейсмических цунами. Исследуется важность учёта перечисленных выше эффектов, границы применимости НЛД-моделей и свойства разработанных численных алгоритмов.

Содержание работы.

Диссертационная работа Гусева О.И. состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 176 наименований. Работа изложена на 180 страницах и содержит 50 рисунков и 3 таблицы.

Во *введении* обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* исследованы одномерные НЛД-уравнения, когда искомые функции зависят от одной пространственной переменной. Выписаны уравнения полной и слабонелинейных дисперсионных моделей, записывающихся в виде законов сохранения, а также их точные решения. Предложен подход к построению численных алгоритмов для этих моделей, основанный на выделении ОДУ для дисперсионной составляющей проинтегрированного по глубине давления и уравнений мелкой воды с модифицированной правой частью. Теоретически исследованы свойства алгоритмов в простейшем случае. Показано, что условие устойчивости на число Куранта в алгоритме для НЛД-модели не более ограничительно, чем в аналогичном алгоритме для классической модели мелкой воды. В задачах об оползневых цунами исследованы границы применимости НЛД-моделей. Показано, что полная НЛД-модель даёт близкие результаты к модели потенциальных течений, расчёты по которой можно считать эталонными в этом классе задач, когда оползень достаточно длинный относительно глубины акватории. Расчёты по слабонелинейной модели типа Буссинеска были близки к полной при всех рассмотренных параметрах оползня, а расчёты по слабонелинейной модели с дополнительным предположением о малости деформаций дна – только в случаях с малыми значениями толщины оползня и его ускорения.

Во *второй главе* рассмотрены НЛД-модели на плоскости (двумерные модели), используемые для решения задач, где сферичностью и вращением Земли можно пренебречь. Численные алгоритмы строятся для расширенных систем НЛД-уравнений, состоящих из эллиптического уравнения для дисперсионной составляющей проинтегрированного по глубине давления и системы уравнений мелкой воды с модифицированной правой частью, что по-

звolyет использовать подходящие численные методы для этих подзадач. Работоспособность алгоритма в областях сложной формы проверена при сравнении расчётов с лабораторными данными в задаче об обтекании острова. При исследовании гипотетических оползневых цунами в Чёрном море замечена определяющая для волнообразования роль начального положения оползня, найдены варианты оползня, способные сгенерировать волны, близкие к наблюдениям на болгарском побережье 07.05.2007. В задаче о сейсмических цунами продемонстрирована важность формы источника для проявления дисперсии.

Третья глава посвящена полной НЛД-модели на вращающейся сфере. Численный алгоритм строился аналогично плоскому случаю. На модельной задаче с простейшими источниками в виде гауссовых возвышений различной эффективной протяжённости показано, что сферичность и вращение Земли увеличивают своё влияние на процесс распространения с увеличением протяжённости источника и дальностью распространения волн. При моделировании реалистичных сценариев возникновения потенциально возможных цунами в Тихом океане отмечается важность учёта дисперсии волн при их длительном распространении и заметную роль неровностей дна для проявления дисперсионных эффектов.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность полученных результатов.

Обоснованность и достоверность диссертационного исследования основывается на использовании строгих математических моделей, для которых выполняются законы сохранения, теоретическом исследовании свойств численных алгоритмов, сопоставлениями полученных численных решений с аналитическими, данными лабораторных исследований, расчётами по полным моделям гидродинамики.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

Разработаны новые численные алгоритмы для решения нелинейно-дисперсионных уравнений, основанные на поочерёдном решении классической системы уравнений мелкой воды с модифицированной правой частью и эллиптического уравнения. Впервые получены численные решения полностью нелинейной дисперсионной модели мелкой воды на вращающейся сфере. Впервые получены численные решения слабонелинейных дисперсионных уравнений, имеющих уравнение баланса энергии.

Представление и публикации результатов.

Основные результаты диссертационной работы Гусева О.И. являются новыми и достаточно полно отражены в 28 публикациях, среди которых 8 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК. Результаты представлены на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

Научная и практическая значимость основных положений диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты имеют важное теоретическое и практическое значение. В рассмотренных задачах исследуется вопрос о возможности и целесообразности использования нелинейно-дисперсионных моделей мелкой воды.

К наиболее интересным и важным результатам, изложенным в диссертации, следует отнести:

- Универсальный подход для решения нелинейно-дисперсионных уравнений, основанный на выделении классической системы уравнений мелкой воды с модифицированной правой частью и эллиптического уравнения.
- Результаты исследования границ применимости НЛД-моделей в задачах о сходе подводного оползня. Показано, что полная НЛД-модель достаточно точно описывает процесс образования волн сходом длинного оползня относительно глубины. Слабонелинейная модель типа Буссинеска давала близкие результаты к полной во всех исследуемых задачах, а слабонелинейная модель с дополнительным предположением о малости деформаций дна – только при малой толщине и ускорениях оползня.
- Результаты исследования гипотетических оползневых цунами в Чёрном море. Замечена определяющая роль положения оползня для картины максимальных зафиксированных образованных волн в акватории. Разработанный программный комплекс позволил путём проведения большого количества расчётов с разными начальными положениями оползня найти варианты, которые могли сгенерировать аномальные волны, зафиксированные на болгарском побережье 07.05.2007.
- Оценки важности учёта сферичности и вращения Земли в зависимости от протяжённости начального возмущения свободной поверхности воды и дальности распространения волн. Показано, что влияние этих эффектов увеличивается с протяжённостью возмущения и дальностью

распространения и в масштабных задачах их учёт необходим для адекватного описания процесса.

- Результаты исследования важности частотной дисперсии в задачах о цунами. Наиболее ярко дисперсионные эффекты проявлялись в оползневых цунами, когда оползень двигался с большими ускорениями, а также при сейсмических источниках, содержащих в начальном возвышении высокочастотные компоненты.

Замечания по диссертационной работе.

1. Разложению полной системы уравнений дисперсионной мелкой воды на подсистему для дисперсионной компоненты и уравнения мелкой воды с правой частью, обусловленной дисперсией посвящено много работ, так в диссертации нет ссылок на работы по этой теме *S.L. Gavriluyk* с соавторами.

2. В диссертации нет ссылок на две работы, непосредственно касающиеся этой тематики. Это

Черевко А.А., Чупахин А.П. Уравнения мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере. II: Простые стационарные волны и звуковые характеристики. ПМТФ, 50:3 (2009), 82-96, [ЧЧ].

Остапенко В.В., Спешилова А.В., Черевко А.А., Чупахин А.П. Численное моделирование волновых движений на вращающемся притягивающем сферическом поясе. ЖВММФ, 55:3 (2015), 469-487, [ОСЧЧ].

Они посвящены аналитическому и численному исследованию уравнений мелкой воды (без дисперсии) на вращающейся притягивающей сфере. В [ЧЧ] получены и исследованы обширные классы точных решений модели, некоторые из них наследуются и дисперсионными уравнениями мелкой воды [101]. В [ОСЧЧ] численно решается задача о распаде разрыва для различных начальных конфигураций водяных хребтов – типа шеврона и эллипса.

Было бы очень интересно провести расчеты таких конфигураций на основе дисперсионной модели. Это позволило бы обнаружить эффекты обусловленные дисперсией и оценить ее вклад на распространение волн на сфере. Важно подчеркнуть, что в [ОСЧЧ] наряду с конкретными расчетами сделаны выводы об общих эффектах распространения волн на сфере: фокусировка и повторение исходной конфигурации в антиподальной позиции.

3. В расчете оползня в Черном море в районе Абрау-Дюрсо распространение волн в конфигурации 1 имеет крайне нерегулярный характер. Для двух других конфигураций прослеживается структура волны,

порожденной оползнем – присутствует головная волна повышения профиля. Чем это обусловлено – несовершенством модели или физикой конфигурации 1?

Заключение о работе.

Диссертация Гусева О.И. является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной теме в области моделирования поверхностных волн. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, а представленные результаты обладают достоверностью, научной новизной и достаточно полно отражены в публикациях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Хочу отметить, в частности, большой объем вычислительных экспериментов в задаче об оползне у болгарского побережья Черного моря. Это характеризует автора как исследователя стремящегося к оптимальному решению и не боящегося большой работы для достижения этой цели.

Считаю, что указанные замечания не снижают высокий уровень работы и ценность полученных результатов, часть из них являются пожеланиями на будущее. Диссертация Гусева О.И. «Численные алгоритмы для расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионных моделей» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заведующий лабораторией
дифференциальных уравнений
Института гидродинамики
имени Лаврентьева СО РАН
Доктор физ.-мат. наук


Чупахин Александр Павлович

23 декабря 2016 г.
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15
email: chupakhin@hydro.nsc.ru
Тел. (383) 333-19-64

Подпись А.П. Чупахина заверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н.


Любашевская Ирина Васильевна