

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 11 апреля 2024 № 3

О присуждении **Иванову Александру Владимировичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Регуляризованные уравнения мелкой воды для моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в задачах геофизики» по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 25.01.2024 (протокол заседания №1/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Иванов Александр Владимирович**, 1995 года рождения, в 2019 году окончил физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» с присвоением квалификации магистр по направлению подготовки 03.04.02 – Физика.

С 2019 г. по 2023 г. соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки «09.06.01 Информатика и вычислительная техника».

В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН во внештатной научно-исследовательской лаборатории «Вычислительная гидро-газодинамика в промышленных процессах».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в период обучения в аспирантуре.

**Научный руководитель – Елизарова Татьяна Геннадьевна**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела №16 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Дианский Николай Ардальянович**, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

**Янышев Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Волгоградский государственный университет**» в своем **положительном** отзыве,

подписанном **Ворониным Александром Александровичем**, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой фундаментальной информатики и оптимального управления ВолГУ, и **Храповым Сергеем Сергеевичем**, кандидатом физико-математических наук, доцентом, и утвержденным **Дзедиком Валентином Алексеевичем**, доктором экономических наук, доцентом, первым проректором ВолГУ указала, что практическая ценность результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в реализации новых вычислительных алгоритмов для моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды, позволяющих моделировать большой спектр задач, в особенности связанных с проблемами окружающей среды. Также практическая ценность состоит в создании решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды RSWEFoam, который, благодаря возможности расчета зон обводнения и осушки, может быть использован для моделирования подтопления береговых зон при значительных изменениях уровня моря. Полученные результаты могут представлять значительный интерес в качестве расчетной модели для моделирования гидродинамики в приближении мелкой воды и моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды для таких организаций и исследовательских институтов, как морской гидрофизический институт РАН (Севастополь), лаборатория свободного программного обеспечения цифрового моделирования технических систем института системного программирования РАН (Москва), институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск) и др.

Работа Иванова А.В. является законченным научно-квалификационным исследованием, основные результаты которого в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, и ее автор, Иванов Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 8 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК, 7 – в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Наиболее значительные публикации соискателя приведены ниже:

1. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Регуляризованные уравнения для численного моделирования течений в приближении двухслойной мелкой воды // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2018. № 5. С. 741–761. **(ВАК, Scopus, WoS)**
2. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Об однородном алгоритме численного моделирования волны цунами // Учен. зап. физ. фак- та Моск. ун-та. 2018. № 3. С. 1830103–1–1830103–6. **(ВАК)**
3. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Численное моделирование переноса пассивного скаляра в мелкой воде с использованием квазигазодинамического подхода // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2020. Т. 60, № 7. С. 1248–1267. **(ВАК, Scopus, WoS)**
4. Иванов А.В. Вычислительный комплекс для моделирования морских течений с применением регуляризованных уравнений мелкой воды // Матем. моделирование. 2021. Т. 33, № 10. С. 109–128. **(ВАК, Scopus, WoS)**
5. Иванов А.В. О реализации модели мелкой воды на базе квазигазодинамического подхода в открытом программном комплексе OpenFOAM // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 28. С. 1–27. **(ВАК)**
6. Elizarova T.G., Ivanov A.V., Kuleshov A.A. Mathematical modelling of Russian northern coastal waters in the shallow water approximation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. P.012017–012017. **(Scopus)**

7. Ice thickening caused by freezing of tidal jet / A. V. Marchenko, E. G. Morozov, A. V. Ivanov et al. // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21, №. 2. P. 1–8. (Scopus, WoS)

Работы [1-7] отражают основные результаты, полученные автором, причем работы [4, 5] являются персональными. Личный вклад автора в работе [1] заключается в построении новой системы регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды и алгоритма ее численного решения, а также валидации алгоритма на большом числе тестовых задач. В работе [2] приведена модификация алгоритма для эффективного расчета движения волны цунами и ее взаимодействия с берегом. Личный вклад автора в работах [3, 7] заключается в построении однородного алгоритма для моделирования переноса примеси в мелкой воде в рамках квазигазодинамического подхода, также совместно с океанологами построена численная модель циркуляции озера Валунден (о. Шпицберген). В работах [4, 6] на основе усовершенствованных алгоритмов численного решения регуляризованных уравнений мелкой воды построен исследовательский комплекс для моделирования прикладных задач, с его помощью выполнено моделирование прибрежной акватории Карского, Печорского и части Баренцева морей. Работа [5] посвящена реализации решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды в рамках открытого пакета OpenFOAM.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах достоверны.

На диссертацию поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, а также 4 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержится ряд замечаний:

*В отзыве ведущей организации ВолГУ:*

1. Необходимо пояснить, как входят внешние силы в регуляризаторы для однослойной и двухслойной моделей мелкой воды. Должны ли они быть включены в виде дополнительных слагаемых или нет?
2. Регуляризованные уравнения мелкой воды (РУМВ) можно получить для баротропного приближения уравнений газовой динамики при специальном выборе функции плотности и показателя адиабаты. В работе было бы полезно описать, какие именно законы сохранения наследуют в уравнении РУМВ при их получении из КГД системы уравнений.
3. Условие устойчивости Куранта в виде (1.15) на стр. 16 не обеспечивает переход к одномерной модели и требует модифицированной формы записи.
4. Решение задачи о циркуляции озера Валунден во второй главе недостаточно физически обосновано. Непонятно, как рассчитываемая концентрация  $C$  связана с температурой воды и толщиной льда. Кроме того, учет силы Кориолиса для очень маленького озера и канала притока заведомо дает меньший вклад по сравнению с неопределенностями из-за известной топографии дна и не учета гидравлического сопротивления.

*В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Дианского Н.А.:*

1. При описании метода расчета приливов в Баренцевом и Карском морях приведены упрощенные условия для скорости на «жидких» границах, не учитывающие характер распространения приливной волны, что должно приводить к ошибкам в расчетах приливной динамики, кроме того, не проведена верификация расчетов приливов, что легко можно было бы сделать путем сравнения рассчитанного и реального приливного уровня моря по данным береговых станций наблюдений, находящихся в открытом доступе.
2. В диссертации не описан переход от уравнений двухслойной мелкой воды к системе однослойной мелкой воды. Такой переход позволил бы отразить связь моделей и их свойства.

3. В работе ничего не сказано о возможностях параллельных расчетов с помощью нового решателя, что является важным при моделировании обширных акваторий на долгий срок.

*В отзыве официального оппонента, к.т.н. Янышева Д.С.:*

1. На стр. 13 в уравнениях (1.3) и (1.4) присутствуют внешние силы. В тексте отсутствуют пояснения по какой причине компоненты внешних сил не входят в дополнительные слагаемые, которые образуются при регуляризации (1.5)-(1.8).
2. Отсутствует двумерная постановка задачи в рамках моделирования двухслойных течений.
3. В тексте диссертации присутствуют незначительные синтаксические и грамматические ошибки.
4. В параграфе 3.2.3 третьей главы представлено решение практической задачи о разрушении плотины вблизи неровной поверхности. Добавленная сила трения (стр. 110) говорит о том, что для задачи, вероятно, проводилось экспериментальное исследование. Возможно, стоило добавить сравнение результатов расчетов с экспериментом.

Отзыв на автореферат от **Сушинова Александра Ивановича**, д.ф.-м.н., члена-корреспондента РАН, профессора, заведующего кафедрой «Математика и информатика» Донского государственного технического университета, а также отзыв на автореферат от **Шеретова Юрия Владимировича**, д.ф.-м.н., профессора кафедры фундаментальной математики и цифровых технологий Тверского государственного университета замечаний не содержат.

В отзыве на автореферат от **Кошелева Константина Борисовича**, к.ф.-м.н., доцента, старшего научного сотрудника лаборатории гидрологии и геоинформатики ФГБУН «Институт водных и экологических проблем СО РАН» в качестве замечания отмечено, что использование декартовой системы координат при решении гидрологических задач в областях с

пространственными масштабами порядка сотен километров может привести к заметным искажениям результатов моделирования.

В отзыве на автореферат от **Епихина Андрея Сергеевича**, к.т.н., заведующего лаборатории №20 ИСП РАН имеются два замечания:

1. Проводилось ли исследование сеточной сходимости и какое было общее количество ячеек в расчетной области при моделировании прикладных задач? Сколько времени проводился один расчет?
2. Какая область применимости реализованных моделей и алгоритмов, например, ограничения по глубине водоемов и высоте волн?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации, включая численное изучение процессов гидро- и газодинамики, моделирование гидротермодинамики океана, решение задач о затоплении территорий, разработку и анализ новых вычислительных алгоритмов, реализации их в виде программного комплекса, применение методов и средств математического моделирования для решения сложных научно-практических задач, что подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

1. **Разработаны** усовершенствованные алгоритмы численного решения регуляризованных уравнений мелкой воды для расчета сухих зон, выполнения условий «хорошей балансировки» и учета внешних сил и приливных воздействий. На базе усовершенствованных алгоритмов **создан** исследовательский комплекс программ для моделирования прикладных задач. С его помощью **выполнено моделирование** прибрежной акватории Карского, Печорского и части Баренцева морей.
2. На основе квазигазодинамического подхода **построена** система регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды и **создан**

алгоритм их численного решения. **Выполнена** валидация алгоритма на характерных модельных задачах.

3. **Предложена** модификация регуляризованной системы уравнений мелкой воды, включающая в себя уравнение переноса пассивного скаляра. **Разработан** и программно **реализован** численный алгоритм решения полученной системы уравнений. С его помощью **проведено моделирование** циркуляции озера Валунден (о. Шпицберген). В численном эксперименте **получены** распределения температур и скоростей, что позволило теоретически обосновать наблюдаемые толщины слоя льда на поверхности озера.
4. На базе усовершенствованных и доработанных алгоритмов решения регуляризованных уравнений мелкой воды **создан** новый решатель RSWEFoam в рамках открытого пакета программ OpenFOAM. **Проведена** апробация решателя на модельных задачах.

**Теоретическая значимость исследования** состоит в том, что в рамках КГД-подхода рассмотрено моделирование неоднородных течений в приближении мелкой воды. Предложен однородный алгоритм расчета набегания волны на берег в рамках КГД-подхода, при котором значительно снижена диссипация численного алгоритма. Выписаны регуляризованные уравнения двухслойной мелкой воды и регуляризованное уравнение переноса. Разработаны и исследованы методы численного решения описанных систем.

**Практическое значение результатов исследования** заключается в реализации новых вычислительных алгоритмов для моделирования неоднородных течений в приближении мелкой воды, позволяющих моделировать большой спектр задач, связанных с проблемами окружающей среды. Также практическая ценность состоит в создании решателя для моделирования течений в приближении мелкой воды RSWEFoam, который, благодаря возможности расчета зон обводнения и осушки, может быть

использован для моделирования береговых зон при значительных изменениях уровня моря.

**Достоверность** представленных результатов подтверждена в ходе тестирования автором всех программных реализаций описанных численных алгоритмов как на модельных задачах с существующим точным решением, так и на известных расчетных примерах. Для результатов расчетов показана монотонная сходимость при сгущении расчетной сетки, а также проведено сравнение с результатами других моделей и алгоритмов. Материалы диссертационной работы были представлены на конференциях и семинарах и опубликованы в российских и зарубежных журналах.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке математической модели регуляризованных уравнений двухслойной мелкой воды, построении регуляризованного уравнения переноса примеси в мелкой воде, написании всех программных кодов, их тестировании и оформлении результатов в виде статей и докладов. Автор самостоятельно построены представленные в работе разностные схемы, численно исследованы свойства использованных численных методов, разработан и реализован новый вычислительный модуль в рамках открытого программного комплекса OpenFOAM для библиотеки КГД/КГиД течений. Автор принимал активное участие в развитии КГД/КГиД методов, отраженных в диссертации. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены диссертационного совета: д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Змитренко Н.В., д.ф.-м.н. Колесниченко А.В., д.ф.-м.н. Гаранжа В.А., д.ф.-м.н. Аристова Е.Н., д.ф.-м.н. Орлов Ю.Н., д.ф.-м.н. Якобовский М.В.

В частности, член совета Головизнин В.М. спрашивал соискателя, в чем заключается метод регуляризации и чем регуляризованные уравнения отличаются от исходных. Соискатель ответил, что метод регуляризации заключается в осреднении уравнений по времени, а разница между

исходными и регуляризованными уравнениями заключается в наличии дополнительных диссипативных слагаемых. Член совета Колесниченко А.В. поинтересовался, какие преимущества имеет квазигидродинамический подход по сравнению с традиционным подходом. Соискатель ответил, что, во-первых, основным преимуществом является использование центральных разностей, во-вторых, использование явной схемы Эйлера и, в-третьих, преимуществом данной работы является интегрирование описанных алгоритмов в открытый комплекс программ OpenFOAM. Член совета Аристова Е.Н. спросила соискателя, были ли проделаны методические расчеты о выборе величины параметра  $\alpha$  и насколько сильно смена задачи влечет за собой смену настроечного коэффициента  $\alpha$ ? Соискатель пояснил, что это было проделано, но не вошло в доклад, в диссертации эти материалы имеются. Он отметил, что при увеличении коэффициента  $\alpha$ , появляются нефизичные сглаженные численные решения, и есть некоторое плато значений коэффициента  $\alpha$ , при котором может рассматриваться численное решение, как правило, это значения  $\alpha$  от 0.1 до 0.7.

Существенных замечаний по диссертации высказано не было. Соискатель ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы, согласился с рядом замечаний, указанных в письменных отзывах, и дал комментарии в необходимых случаях.

В дискуссии приняли участие: члены совета – д.ф.-м.н. Головизнин В.М., д.ф.-м.н. Змитренко Н.В., д.ф.-м.н. Гаранжа В.А., д.ф.-м.н. Якобовский М.В. и к.ф.-м.н. Крапошин М.В., ведущий системный архитектор ООО «Сервионика».

На заседании 11 апреля 2024 года диссертационный совет принял решение за разработку методов моделирования неоднородных течений и течений со свободной поверхностью в приближении мелкой воды, вносящих существенный вклад в развитие математического моделирования процессов гидродинамики, присудить Иванову Александру Владимировичу ученую

степень кандидата-физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета 24.1.237.01

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.237.01



М.В. Якобовский

М.А. Корнилина

11.04.2024 г.