

На правах рукописи



Исаченко Игорь Александрович

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ИНТРУЗИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ
ПЕРЕМЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ
СРЕДЕ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Калининград – 2019

Работа выполнена в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гриценко Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Показеев Константин Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Кафедрой физики моря и вод суши Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Цыденов Баир Олегович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории вычислительной геофизики Механико-математического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»**

Защита состоится « » декабря 2019 г. в ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.dissert.ocean.ru> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Гинзбург Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Различные по своему происхождению и масштабам плотностные течения (придонные и промежуточные) встречаются повсеместно в океанах, морях, озерах и водохранилищах и давно стали объектом исследований [Баренблатт, 1978; Hinwood, 1972; Федоров, 1976; Журбас, 1988; Simpson, 1997; Зацепин, 1997; Жмур и др., 1998; Гриценко, 1998; Кузьмина, 1999; Shapiro et al., 2003; Самолюбов, 2007; Monaghan, 2007]. Их возникновение обусловлено разностью плотностей водных масс между бассейнами, соединенными проливами, охлаждением шельфовых вод и их осолонением при льдообразовании или испарении, как следствие стока рек и другими причинами. Такие течения являются важной компонентой процесса обновления придонных и промежуточных вод.

Независимо от происхождения (водообмен между шельфовыми водами и фьордом, каскадинги, речной сток и др.), стратифицированные по плотности течения имеют в той или иной степени нестационарный, перемежающийся или эпизодический характер [Gade and Edwards, 1980; Simpson, 1997; Ivanov et al., 2004; Самолюбов, 2007]. Известно [Nof, 1991], что в синоптическом интервале масштабов длины и времени вариации течения приводят к образованию изолированных линз хорошо перемешанной жидкости, последующий коллапс которых [Журбас и Кузьмина, 1981] приводит к образованию антициклонических вихрей в результате геострофического приспособления. Широко известным примером таких образований являются линзы средиземноморской воды в северо-восточной Атлантике [Armi et al., 1989]. В то же время, устойчивая и самоогласованная структура плюмов средиземноморских [Baringer and Price, 1997] и красноморских [Peters et al., 2005; Matt and Johns, 2007] вод на шельфе на разрезах, выполняемых за период времени более 1–2 суток, а также аналитические оценки заставляют ряд авторов предположить [Peters et al., 2005], что колебания расхода течения с периодами основных компонент приливов и меньших масштабов затухают на небольшом расстоянии от проливов. Вместе с тем, осо-

бенности динамики и перемешивания плотностных течений поблизости от переменных источников исследованы недостаточно. Также стоит упомянуть изменения плотности затоковых вод, например, сезонные изменения T,S -характеристик красноморской воды, поступающей из пролива Баб-эль-Мандеб [Bower et al., 2000], или суточные колебания температуры рек, впадающих в стратифицированные по температуре озера [Vidal et al., 2012], которые изменяют глубину нейтральной плавучести интрузии и, таким образом, отчасти объясняют многослойную и пятнистую структуру вод в прилегающих акваториях.

Невысокое временное и пространственное разрешение ранее выполненных натурных наблюдений и значительные технологические сложности, трудоемкость и стоимость экспериментальных измерений повышают важность лабораторного и численного моделирования. Этим объясняется выбор численного моделирования в качестве основного метода исследования и обращение к результатам лабораторных экспериментов при верификации модели. Имеющиеся в литературе немногочисленные примеры исследований плотностных течений переменной интенсивности методами лабораторного и численного моделирования показывают, что внутренняя структура и динамика течений от переменного источника существенно отличаются от таковых у стационарных течений или классических примеров плотностных течений конечного объема [Sutherland, 2002; Fernandez and Imberger, 2008a, 2008b; O'Callaghan et al., 2010]. Однако всестороннее описание происходящих при этом процессов еще далеко от завершения.

Совокупность перечисленных факторов позволяет констатировать актуальность исследования влияния фактора нестационарности источника на динамику и свойства интрузионных течений.

Целью данной работы является исследование динамики и структурных особенностей интрузионных течений переменной интенсивности. В качестве основного метода исследования использовалось двумерное численное моделирование. Для достижения поставленной цели и в связи с выбранным методом исследования автором были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. На основе анализа результатов натурных наблюдений, лабораторного и численного моделирования плотностных течений переменной интенсивности подготовить новую версию нелинейной двумерной (в вертикальной плоскости) численной модели, включая разработку набора расчетных условий на границах модельного пространства, обеспечивающих корректный учет в модели фактора переменного расхода источника, а также набор диагностических процедур для детального анализа получаемых в расчетах течений.

2. Провести комплексную верификацию модели на примере хорошо известных задач поведения отдельных объемов воды с плотностью, отличной от окружающей.

3. Изучить особенности динамики и изменчивости вертикальной структуры интрузионных течений, вызванных поступлением конечных объемов жидкости в пикноклин, а также процесс и результаты взаимодействия отдельных импульсов интрузионного течения между собой в различных режимах поступления жидкости.

4. Применить полученные выводы к анализу интрузионных течений, наблюдаемых в натурных условиях.

Научная новизна работы

Разработана новая версия нелинейной двумерной (в вертикальной плоскости) численной модели стратифицированных по плотности течений, отличающаяся оригинальным набором расчетных условий на границах, задающих импульсный приток жидкости, параллельной организацией расчетов и дополненная необходимым набором диагностических процедур.

Впервые описаны особенности вертикальной структуры импульсных интрузионных течений в их взаимосвязи с параметрами источника при взаимодействии двух последовательных интрузий в пикноклин с короткими интервалами времени между затоками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что процесс распространения в пикноклине интрузионного течения, формирующегося в условиях переменного расхода втекающей жидко-

сти с хорошо выраженными отдельными периодами интенсивного втока («импульсами»), отличается от эволюции одиночной интрузии из-за взаимодействия импульсов затока между собой, которое может проявляться в увеличении безразмерной скорости фронта интрузии и проникновении объема последующего затока в головную часть предыдущего.

2. Выполнен анализ условий возникновения взаимодействия отдельных импульсов затока промежуточной плотности в пикноклин. Установлено, что для взаимодействия двух одинаковых импульсов затока необходимо, чтобы отношение времени между затоками к их продолжительности не превышало единицы. Наиболее значимым параметром, определяющим вторжение объема второго затока в головную часть первого, является начальное число Фруда затока, критическое значение которого близко к единице.

3. Выделены области возможной неустойчивости интрузионного течения, образующиеся при коллапсе плотностной неоднородности (пятна) в линейно стратифицированной жидкости, расположенные внутри возникающих вихрей и наиболее интенсивные в конце первой (быстрой) – начале второй стадии процесса.

Достоверность научных результатов и выводов работы обеспечивается использованием проверенной численной модели, стандартных разностных схем и алгоритмов, всесторонней верификацией модели на основании данных лабораторных экспериментов и учетом ее ограничений.

Научная и практическая значимость работы

Численная модель и полученные в работе результаты могут служить основой для дальнейшего изучения интрузионных течений переменной интенсивности, а также для планирования лабораторных и натурных экспериментов. Эффект ускоренного распространения пассивной примеси в импульсном течении может быть важен при оценке переноса загрязнений из прибрежных областей в глубоководные зоны морей и озер. Разработанное и протестированное лабораторное устройство формирования безимпульсных плотностных течений

может облегчить проведение лабораторных экспериментов со стратифицированными течениями.

Личный вклад автора состоит в систематизации известных натуральных исследований плотностных течений, программной реализации новой версии численной модели и вспомогательных алгоритмов диагностики параметров течений, выполнении и визуализации результатов расчетов. Автору принадлежит ведущая роль в анализе результатов моделирования и их сопоставлении с экспериментальными и натурными данными, подготовке результатов к опубликованию. Часть экспериментальных данных о течениях конечного объема плотной жидкости по наклонному дну для сравнения с расчетами была получена в гидрлотке АО ИО РАН при участии автора. Автор также активно участвовал в разработке и изготовлении оригинального выпускного устройства, использованного при проведении экспериментов.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на международных конференциях: «BSSC 2013» (26–30 августа 2013, Клайпеда, Литва), «Fluxes and structures in fluids» (23–26 июня 2015, Калининград), «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы – 2018» (30.10–2.11.2018, Москва). Результаты работы также обсуждались на секции Ученого совета Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (2018) и заседании Ученого совета Физического направления ИО РАН (2018, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК, на момент публикации (работы [1–5]), 1 патент на полезную модель [6], 1 статья в другом рецензируемом научном издании [7] и 5 тезисов докладов на международных научных конференциях [8–12].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение, Списка использованных источников и Приложения. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 56 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 168 наименований.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность заведующей Лабораторией физики моря АО ИО РАН, д.ф.-м.н. И.П. Чубаренко за обсуждение результатов диссертации и замечания к тексту работы. Автор благодарит д.ф.-м.н. А.Г. Зацепина за внимание к работе, д.ф.-м.н., профессора В.М. Журбаса за замечания и предложения, которые, хочется надеяться, позволили улучшить качество работы. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н., профессору В.А. Гриценко за внимательное руководство и поддержку интереса к тематике исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о публикациях автора по теме работы, о личном вкладе автора и апробации результатов.

Глава 1 посвящена обзору публикаций, в которых рассматривается возникновение, развитие, структура и свойства интрузионных течений в стратифицированных водоемах.

В **разделе 1.1** представлены сведения о характерных особенностях структуры и динамики плотностных течений независимо от их происхождения, которые могли быть связаны с нестационарностью их источника. Рассмотрены исследования течений в морских проливах, соединяющих бассейны с водами различной солености, и затоковых вод на прилегающих шельфах [Latif et al., 1991; Baringer and Price, 1997; Jarosz et al., 2005; Matt and Johns, 2007], гидродинамики фиордов [Syvitski et al., 1987], каскадинговых течений различного происхождения [Костяной и Степанов, 1991; Ivanov et al., 2004; Головин и др., 2011], антропогенных стоков [O'Callaghan et al., 2015] и др.

Лабораторное и теоретическое моделирование интрузионных течений рассмотрено в **разделе 1.2**. Известные качественные и количественные закономерности эволюции интрузий в классических постановках [von Karman, 1940;

Benjamin, 1968; Simpson, 1997; Huppert, 2006] являются фундаментом при изучении более сложных течений, в известной степени приближенных к натурным ситуациям. Сравнительно мало работ посвящено исследованию собственно процесса взаимодействия нескольких импульсов плотностного течения между собой в вертикальной плоскости [Sutherland, 2002; Fernandez and Imberger, 2008b]. Представленные в них результаты лабораторных экспериментов, демонстрирующие связанные с резкими изменениями расхода втекающей жидкости особенности плотностных течений, требуют дальнейшего изучения.

Краткий обзор результатов численного моделирования, представленный в **разделе 1.3**, дает представление о классах моделей, используемых в изучении свойств интрузионных течений. Трехмерные модели реальных акваторий [Aiki et al., 2006; Sato et al., 2006; Журбас и др., 2012] позволяют изучать вклад различных внешних факторов в развитие плотностных течений в условиях численного эксперимента, по возможности максимально полно воспроизводящего условия естественной среды, но зачастую их решения страдают от недостаточно высокого пространственного (вертикального) и временного разрешения. Идеализированные модели [Härtel et al., 2000; Maderich et al., 2001], главным образом двумерные, дополненные подходящим набором диагностических процедур, остаются важнейшим инструментом изучения интрузионного процесса на современном этапе. Результаты моделирования приповерхностных интрузий, возникающих при пресноводном стоке в фиорд [O'Callaghan et al., 2010], подчеркивают, что некоторые наблюдаемые в природе особенности распространения интрузионных течений могут быть связаны с резкими изменениями расхода, однако взаимосвязь параметров источника с особенностями течений исследована недостаточно.

Глава 2 посвящена описанию используемой в работе численной модели, которое включает в себя информацию как по исходной модели (Гриценко, Юрова, 1997), так и по модификациям и дополнениям, сделанным автором.

В работе используется авторская версия нелинейной двумерной численной модели стратифицированных по плотности течений в вертикальной (XZ)

плоскости [Гриценко, 1999; Зацепин и др., 2005; Гриценко и др., 2008]. Модель формулируется на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска.

В разделе 2.1 приводится система основных уравнений модели [Гриценко и Юрова, 1997, 1999; Гриценко, 1999], которая имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \nu_T \Delta \omega, \quad (1)$$

$$\Delta \psi = \omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} = D_T \Delta \sigma, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_T \Delta c, \quad (4)$$

где t – время, $\omega = u'_z - w'_x$ – завихренность, ψ – функция тока, $\sigma = \rho - \rho_0$ – избыточная плотность, $u = \psi'_z$, $w = -\psi'_x$ – составляющие скорости по осям x и z соответственно, g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность, ρ_0 – плотность верхнего слоя жидкости, $c \in [0,1]$ – безразмерная концентрация трассера, которым помечается водная масса течения, ν_T и D_T – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии, Δ – оператор Лапласа.

Наклонное дно может быть смоделировано путем отклонения от вертикали на необходимый угол α направления вектора силы тяжести [Chubarenko and Gritsenko, 2002; Зацепин и др., 2005] и заменой источникового члена в уравнении переноса завихренности на

$$\frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \cos \alpha - \frac{\partial \sigma}{\partial z} \sin \alpha \right).$$

Параметризация турбулентного перемешивания рассмотрена в разделе 2.2. Учет турбулентности в модели осуществляется в рамках модели локально-постоянных коэффициентов турбулентного обмена импульсом и массой [Анучин и Гриценко, 1988; Гриценко и Юрова, 1997; Гриценко, 1999], в рамках которой значение коэффициента турбулентной вязкости в каждой точке модельного пространства вычисляется согласно выражению $\nu_T = \nu_0 + \nu_1 c(t, x, z)$, где ν_0 и ν_1 – коэффициенты обмена импульсом вне и внутри интрузионного плюма соответственно. Предполагается, что интенсивность пульсационных движений

внутри и вне языка придонного плотностного или интрузионного течения отличается в несколько раз, что отражает подавление вертикального турбулентного обмена силами плавучести на границе раздела двух различных по плотности жидкостей [Озмидов, 1968]. Подчеркнем, что в рамках рассматриваемого круга задач динамически активными являются только воды интрузионного объема, обладающие определенным уровнем пульсационных движений по своему происхождению, в то время как окружающая жидкость в начальный момент времени считается неподвижной и нетурбулентной. В расчетах учет разницы в уровнях перемешивания обеспечивает подмодель турбулентности с локально-постоянными коэффициентами.

Использование локально-постоянного коэффициента турбулентной вязкости обусловлено также невысокой энергетикой импульсных течений. В самом деле, импульсное течение в рассматриваемых задачах не является напорным, т. е. после «получения» некоторого количества энергии в результате затока конечный объем воды движется далее по инерции. В условиях диссипации начального и непополняемого запаса энергии, генерация турбулентности не может быть значительной. В Главе 3, посвященной тестовым расчетам по модели, это продемонстрировано на примере коллапса пятна в стратифицированной жидкости. Таким образом, выбранный способ моделирования турбулентного перемешивания учитывает особенности процессов турбулентного перемешивания в неоднородной по плотности жидкости и адекватен для рассматриваемого в работе класса задач.

В разделе 2.3 приводится описание используемых численных схем. Уравнения модели решаются явными конечно-разностными методами на прямоугольной сетке с равномерным шагом. При аппроксимации производных по пространству в уравнениях переноса используется схема с направленными разностями, обладающая свойством консервативности и транспортности. Уравнение Пуассона, связывающее завихренность с функцией тока, решается на каждом шаге по времени путем итераций по методу последовательной верхней релаксации со своими граничными условиями. С целью перехода к параллель-

ным версиям вычислительных процедур в модель был добавлен вариант алгоритма с нечетно-четным обходом узлов, исключаящий зависимость по данным внутри одной итерации [Хокни и Иствуд, 1987].

Раздел 2.4 посвящен вариантам постановки расчетных условий на границах модельного пространства, используемым в работе. Для задач с переменным притоком жидкости через границу модельного пространства была разработана модель входного створа. Она состоит из: (i) расчетного условия в узлах конечно-разностной сетки на боковой границе расчетной области в пределах входного створа, (ii) согласованного с ним расчетного условия на противоположной границе, (iii) способа задания переменной скорости притока жидкости, а также импульсного изменения расхода с заданного постоянного значения до нуля и обратно.

В **разделе 2.5** приводится схема основной итерации модели и описываются модификации модели для параллельного исполнения на мультипроцессорных (многоядерных) системах с общей памятью (SMP).

Раздел 2.6 посвящен диагностическими процедурами, под которыми понимаются вспомогательные подпрограммы, выполнение которых не влияет на решение основных уравнений модели, но позволяет получить дополнительную информацию об исследуемом процессе. При работе над моделью (модификация и пробные расчеты) были реализованы многочисленные диагностические процедуры, которые удобно разделить на 3 группы: (1) простые преобразования исходных расчетных полей, например, вычисление компонент вектора скорости или градиентного числа Ричардсона; (2) комплексные процедуры: блок пассивных трассеров и блок расчета траекторий лагранжевых частиц; (3) процедуры отслеживания положения фронта (или головы) плотностного течения.

Совмещение встроенных диагностических процедур и внешних пакетов визуализации позволило ускорить получение информации о проводимом расчете, что особенно полезно на этапах тестирования модели и предварительных расчетов течений. Наиболее эффективным для анализа структурных особенностей течений оказалось использование множества различных трассеров ней-

тральной плавучести с различными начальными условиями, с целью как визуализации структуры течения, так и автоматического отслеживания фронта интрузии.

В Главе 3 обсуждаются четыре примера (рис. 1) хорошо известных задач с целью верификации результатов путем их сопоставления с уже известными решениями и демонстрации возможностей модели.

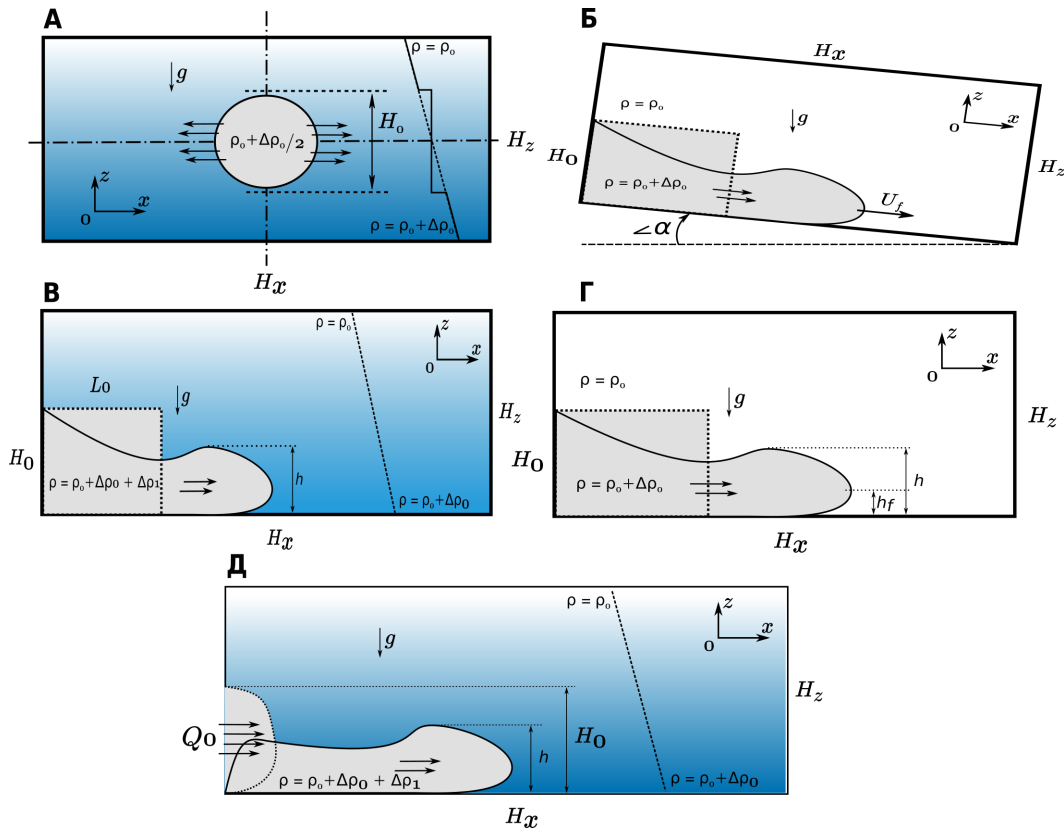


Рисунок 1. Схемы тестовых задач Главы 3. **А** – коллапс однородного пятна в линейно стратифицированной жидкости; **Б** – движение конечного объема жидкости по склону дна в однородной среде. **В** и **Д** – течение вдоль горизонтального дна в линейно стратифицированной среде, причем в случае **Д** эквивалентный объем жидкости вводится в модельное пространство в течение заданного промежутка времени; **Г** – движение конечного объема жидкости по горизонтальному дну в однородной среде. Обозначения: Ox и Oz – координатные оси, H_x и H_z – длина и высота модельного пространства, H_0 – высота или диаметр плотностной неоднородности в начальный момент времени, L_0 – ее длина, ρ – плотность жидкости, ρ_0 – плотность жидкости на поверхности, $\Delta\rho_0$ – характерный перепад плотности в модельном пространстве, $\Delta\rho_1$ – начальный перепад плотности между плотностной неоднородностью и придонным слоем жидкости, g – ускорение силы тяжести, α – угол наклона дна, U_f – скорость фронта течения, h – высота головы придонного течения, h_f – возвышение носа головы над дном, Q_0 – удельный расход втекающей через входной свор жидкости

Рассмотрены плотностные течения, возникающие при эволюции конечного объема воды с плотностью, отличной от окружающей ее воды, в толще линейно стратифицированной жидкости (**раздел 3.1**), на горизонтальном дне в однородной (**раздел 3.2**) и в линейно стратифицированной (**раздел 3.3**) среде и на наклонном дне (**раздел 3.4**). Интрузионное течение вдоль дна в линейной стратификации формировалось не только за счет растекания изначально неподвижного объема жидкости (рис. 1В), но и при введении того же объема через входное отверстие в боковой стенке бассейна (рис. 1Д). Это подтвердило способность модели получать физически непротиворечивые и качественно согласующиеся с лабораторными экспериментами результаты при кратковременном притоке жидкости через входной створ.

В задаче о коллапсе пятна в линейно стратифицированной жидкости (**раздел 3.1**) дополнительно было проанализировано распределение градиентного числа Ричардсона (Ri) (рис. 2) в различные моменты времени, изменение во времени минимального по пространству значения Ri и максимального по пространству значения модуля вектора скорости.

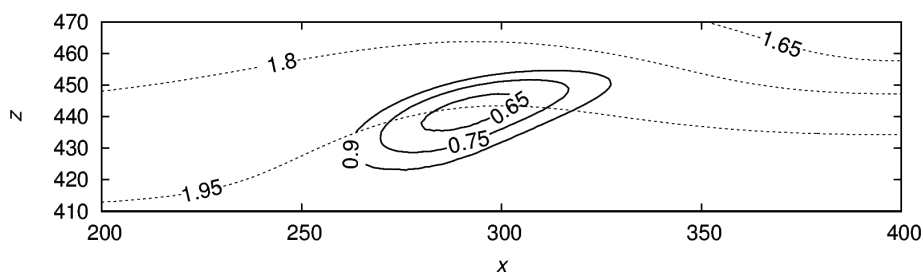


Рисунок 2. Изолинии Ri (сплошные линии) и изолинии избыточной плотности (штриховые линии). Показана только часть расчетной области

Предлагаемая модель хорошо воспроизводит основные свойства рассмотренных течений, в частности: многостадийность процесса коллапса плотностной неоднородности в линейно стратифицированной жидкости и скорость растекания на начальной и основной стадиях, форму головной части придонной интрузии в однородной жидкости и высоту носа над дном, экспериментальную зависимость скорости растекания конечного объема по дну в линейно стратифицированной жидкости на начальной стадии в зависимости от начальных

условий, а также скорость опускания конечного объема соленой воды по наклонному дну, полученная в сериях лабораторных экспериментов в гидрлотке с использованием оригинального выпускного устройства (рис. 3).

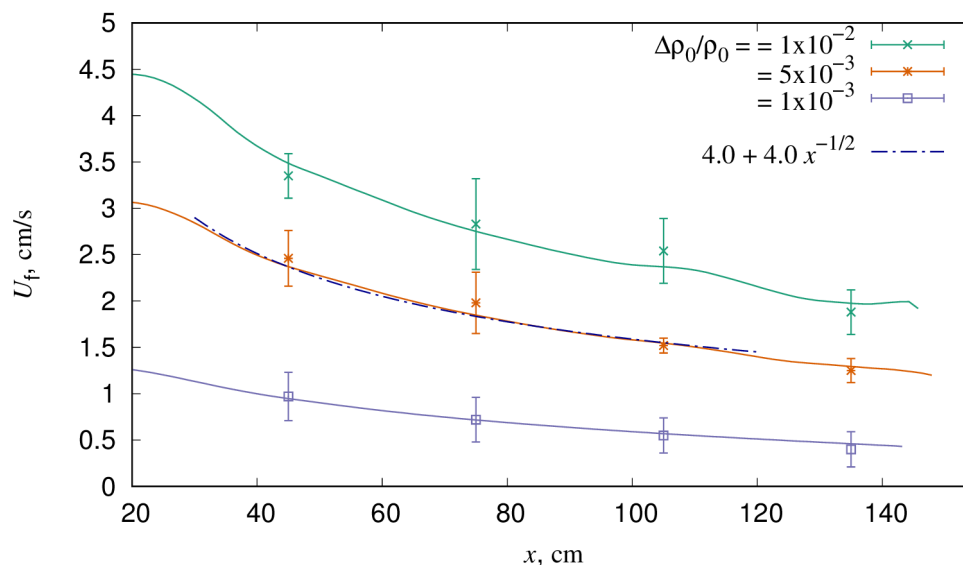


Рисунок 3. Зависимость скорости фронта гравитационного течения U_f , порожденного движением конечного объема плотной жидкости по склону дна, от координаты x вдоль линии дна. Точками показаны полученные в сериях экспериментов значения при разных перепадах плотности между начальным объемом и окружающей жидкостью.

Экспериментальные данные представлены в виде средних значений, по измерениям в 6 экспериментах с одинаковыми параметрами \pm среднеквадратическое отклонение.

Сплошными линиями изображены зависимости, полученные в аналогичных численных экспериментах. Для сравнения штрихпунктирной линией на графике приведена зависимость вида $U_f \sim x^{-1/2}$, предложенная в [Beghin et al., 1981]

В **Главе 4** рассмотрены результаты расчетов интрузионных течений в пикноклин, вызванных импульсным затокком воды промежуточной плотности.

Раздел 4.1 посвящен постановкам задач главы. Схема задач данной главы показана на рис. 4. Основные параметры задачи: H_0 – высота входного створа, H_z – полная высота бассейна, ρ_0 и $\rho_0 + \Delta\rho_0$ – плотность жидкости в верхнем и нижнем слоях стратификации соответственно, g – ускорение силы тяжести, β – толщина промежуточного слоя стратификации с высоким градиентом плотности, Q_0 – двумерный расход, с которым происходит ввод в модельное пространство жидкости через входной створ, Δt_0 – продолжительность промежутка времени, в течение которого происходит заток, Δt_1 – промежуток времени между затокками. Определив $g' = g \Delta\rho_0/\rho_0$, $U_w = \sqrt{g' H_0}$, $U_0 = Q_0/H_0$ и взяв в качестве масштаба вре-

мени отношение H_0/U_w , выполнено масштабирование переменных модели, с использованием классического подхода анализа размерностей (Баренблатт, 1982). Анализ совокупности параметров, входящих в начальные и граничные условия модели, позволил предложить следующий вид определяющих безразмерных параметров: H_0/H_z (относительная высота входного створа), β/H_0 (относительная толщина пикноклина), $U_0/U_w = Fr_0$ (число Фруда, определенное по параметрам входного створа, или «начальное число Фруда»), $\Delta t_0 U_0/H_0$ (характерный удельный объем затока), а также относительное время между затоками $\Delta t_1/\Delta t_0$ при наличии повторного затока. Еще один определяющий параметр – число Рейнольдса $Re_0 = U_0 H_0/\nu_0$ – возникает при переходе к безразмерным переменным в исходных уравнениях модели. При достаточно больших числах Рейнольдса в качестве основного определяемого параметра уместно взять число Фруда $Fr_H = U/U_w$ («стационарное число Фруда»), где U – скорость движения фронта интрузионного течения на стационарной стадии.

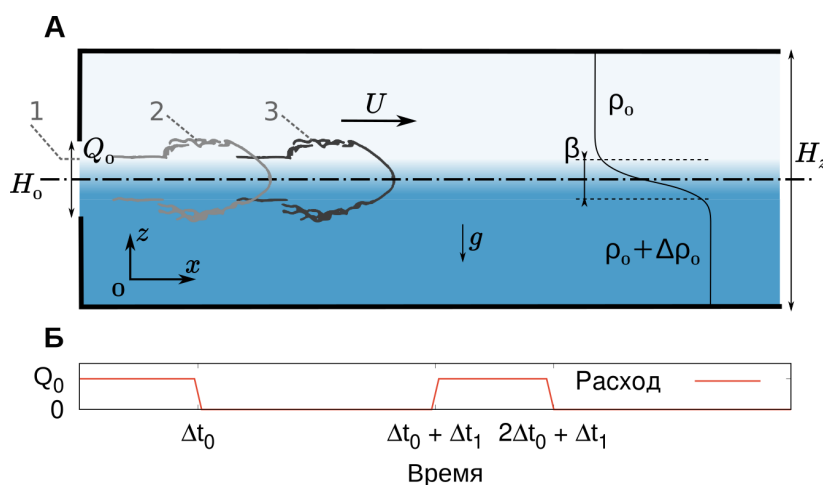


Рисунок 4. Схема задачи. А – структура модельного пространства, Б – временная диаграмма расхода через входной створ. Цифрами обозначены: 1 – входной створ, 2 и 3 – контуры объемов воды, поступивших через входной створ, которые в расчете определяются по полю трассера

В разделе 4.2 рассмотрен процесс распространения интрузии в пикноклине после однократного затока и исследована реакция интрузионного течения на изменение основных параметров. Расчетные течения, в целом, соответствуют фотографиям, полученным в лаборатории при формировании интрузии за счет освобождения неподвижного объема жидкости промежуточной плотности

[Britter and Simpson, 1981; Faust and Plate, 1984]. Описана связь безразмерных величин Fr_0 и $\Delta t_0 U_0 / H_0$ с формой и размерами интрузии в момент окончания притока жидкости. Исследованы числа Фруда Fr_H интрузии при ее стационарном движении от β / H_0 , Fr_0 и $\Delta t_0 U_0 / H_0$, полагая здесь и далее величину H_0 / H_z постоянной (1/7). Показано, что увеличение относительной толщины пикноклина уменьшает скорость интрузии, а параметры источника (Fr_0 и $\Delta t_0 U_0 / H_0$) имеют критические значения, выше которых не оказывают на нее влияния.

В разделе 4.3 обсуждаются интрузионные течения, сформированные двукратными затоками (см. рис. 4Б) с различным относительным временем между импульсами $\Delta t_1 / \Delta t_0$ и различными параметрами источника. При этом анализируется изменение стационарного числа Фруда первой интрузии. Выполненные серии расчетов указывают на возможное взаимодействие последовательных интрузий в пикноклин при условии, что время между затоками меньше времени затoka ($\Delta t_1 / \Delta t_0 < 1$), рис. 5.

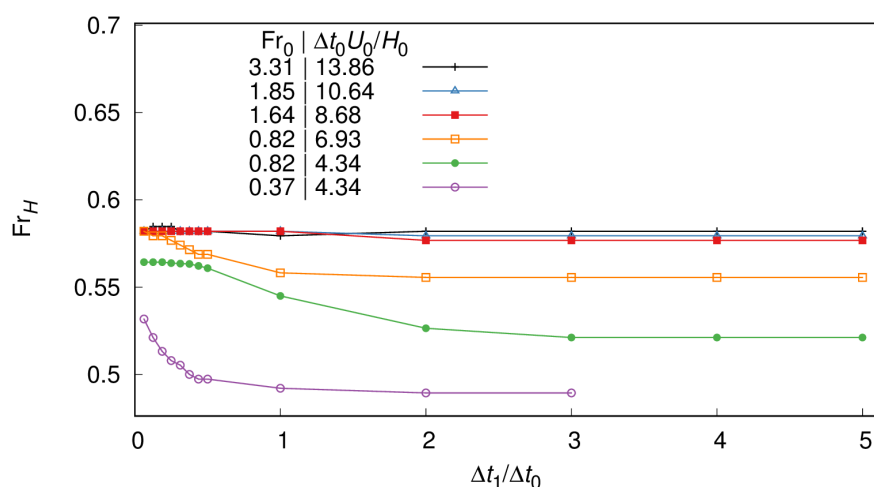


Рисунок 5. Значения числа Фруда первой интрузии при стационарном движении (Fr_H) в зависимости от относительного времени между затоками $\Delta t_1 / \Delta t_0$ при различных значениях Fr_0 и $\Delta t_0 U_0 / H_0$. Видно, что повторный заток влияет на Fr_H при $\Delta t_1 / \Delta t_0 < 1$

Раздел 4.4 посвящен анализу внутренней структуры интрузионного плюма при двукратном затоке с $\Delta t_1 / \Delta t_0 < 1$ и различных параметрах источника Fr_0 и $\Delta t_0 U_0 / H_0$. Для выделения структуры течения объем каждого затока помечался отдельным полем пассивного трассера. Пример двух наиболее отличающихся по структуре течений показан на рис. 6. В приложении к задачам геофизиче-

ской гидродинамики, проведенные расчеты применимы к интрузионным течениям ($\Delta\rho_0/\rho_0 \sim 10^{-5}$), пульсации скорости которых имеют масштаб времени часов–суток, при характерных скоростях течения единицы–десятки см/с и пространственных (вертикальных) масштабах единиц–десятков метров.

В разделе 4.5 выполнено сравнение результатов моделирования интрузионного течения при использовании разных способов параметризации турбулентного обмена и подтверждена адекватность выбранной модели рассматриваемому кругу задач. Для этого дополнительно выполнены два типа расчетов: (1) без использования подмодели турбулентности, т. е. с молекулярными коэффициентами обмена импульсом и массой, одинаковыми во всем модельном пространстве; и (2) с одинаковым во всем модельном пространстве коэффициентами турбулентного обмена.

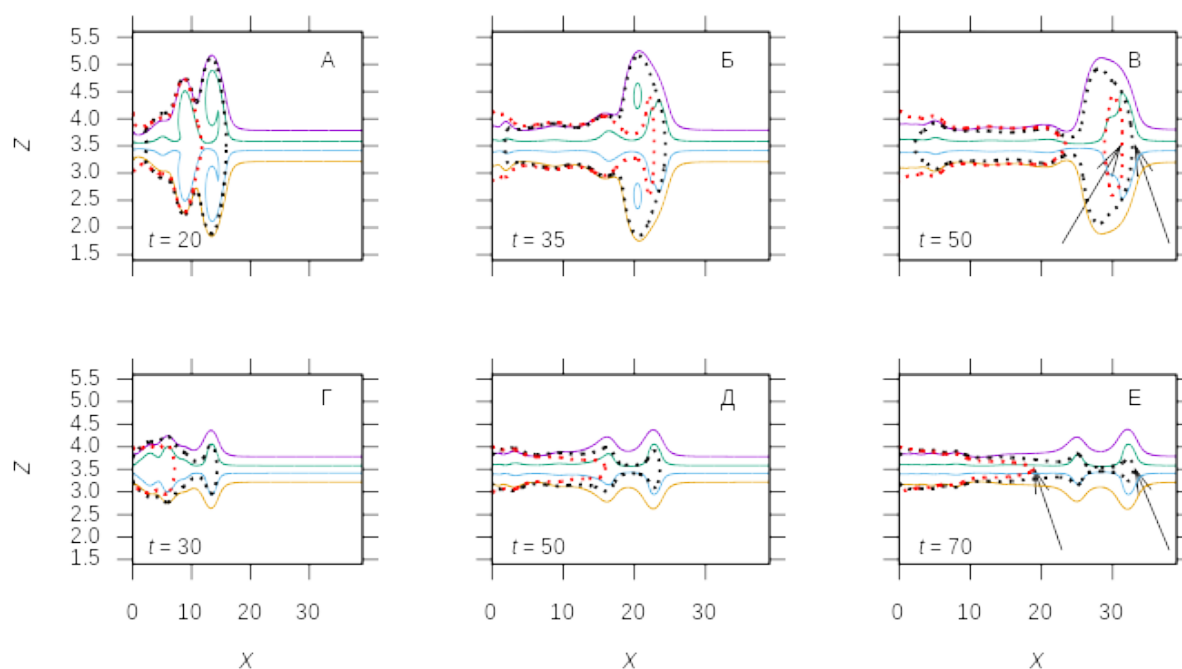


Рисунок 6. Пример двух режимов развития течения. Показано распределение изолиний безразмерной избыточной плотности (сплошные линии, значения 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) и трассеров (значение 0.1) первого (черная штриховая линия) и второго (красная штриховая линия) затоков. В каждой строке изображения слева направо соответствуют последовательно увеличивающимся моментам безразмерного времени t (значения указаны на графиках) внутри одного из двух расчетов с параметрами А – В: $Fr_0 = 1.5$, $\Delta t_0 U_0 / H_0 = 8.5$, $\Delta t_1 / \Delta t_0 = 0.25$ и Г – Е: $Fr_0 = 0.4$, $\Delta t_0 U_0 / H_0 = 4.5$, $\Delta t_1 / \Delta t_0 = 0.25$. Стрелками отмечено положение наиболее удаленных от источника точек на изолиниях трассеров первого и второго затоков

Обнаруженные эффекты взаимодействия затоков сохраняются при изменении интенсивности турбулентного обмена внутри и вне языка интрузии. Тестовые расчеты показывают, что быстрое замедление горизонтального распространения водной массы второго затока при небольших начальных числах Фруда связано с ее распространением в турбулентном следе первого.

В разделе 4.6 обсуждается приложение полученных результатов к натурным ситуациям. Отрыв вдольсклонового плотностного потока от дна с образованием интрузий в промежуточных слоях более вероятен в случае небольшого перепада плотности с окружающей жидкостью [Cortés et al., 2014], поэтому рассмотрены плотностные течения, динамика которых определяется перепадом температуры. Быстрое формирование и изменение горизонтальных градиентов температуры может происходить в ответ на суточные колебания теплотока через поверхность водоема, на которые быстрее всего реагируют небольшие реки [Fernandez and Imberger, 2008a; Vidal et al., 2012] и мелководная прибрежная область водоемов [Monismith et al., 1990; Farrow, 2004; Чубаренко, 2010]. Водообмен между прибрежной областью и глубокой частью водоема может сопровождаться развитием приповерхностной струи, вдольсклонового потока и промежуточного компенсационного течения. Для всех рассмотренных натуральных примеров [Fer et al., 2002; Vidal et al., 2012; Чубаренко и др., 2017] характерна недостаточная детальность измерений гидрофизических полей по пространству и времени для прямого наблюдения взаимодействия интрузионных течений. Можно предположить потенциальную реализуемость модельного сценария в натуральных ситуациях в непосредственной близости к месту отрыва от наклонного дна плотностного потока, возникающего в результате дифференциального прибрежного прогрева или выхолаживания в суточном ритме [Fer et al., 2002] или впадения речных вод в стратифицированный по температуре водоем [Vidal et al., 2012].

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Анализ натуральных наблюдений в Мировом океане показал широкий спектр примеров формирования интрузионных течений переменной интенсивности, возникающих при водообмене соседних водных бассейнов, при обмене вод между шельфом (фиордом) и глубоким морем, в результате неоднородности процессов перемешивания или действия внешних факторов. Наблюдения демонстрируют как переменность внешних воздействий, приводящих к формированию интрузионных течений, так и характерную нестационарность их развития. Сравнительно мало работ посвящено исследованию собственно процесса взаимодействия нескольких импульсов плотностного течения между собой. Представленные в них результаты лабораторных и численных экспериментов показывают существование ряда особенностей импульсных плотностных течений, однако их взаимосвязь с параметрами источника исследована недостаточно. Численное моделирование является одним из основных инструментов дальнейших исследований в этой области.

2. Разработана и протестирована авторская версия двумерной нелинейной численной модели динамики стратифицированной по плотности жидкости в вертикальной плоскости. Предложен набор новых расчетных условий на границах модельного пространства, задающих переменный приток жидкости. Реализованы параллельные алгоритмы расчета, подготовлен набор специализированных диагностических процедур, расширяющих возможности модели как инструмента исследования рассматриваемого класса течений. Модель адекватно воспроизводит поля плотности, завихренности и функции тока при интрузии от классического шлюзового устройства и при формировании интрузий за счет кратковременного притока жидкости через входной створ, что позволяет использовать ее для исследования интрузионных течений в стратифицированной среде от переменного (импульсного) источника.

3. Применение модели к исследованию течений, возникающих при эволюции изначально неподвижного конечного объема воды, отличной от окружа-

ющей по плотности, позволило выявить новые, ранее не описанные детали такого рода течений. Так, при коллапсе пятна в линейно стратифицированной жидкости, анализ распределения величины градиентного числа Ричардсона (Ri) в пространстве и во времени позволил выявить в конце первой (быстрой) стадии области возможной неустойчивости формирующегося интрузионного течения. Совместный анализ пространственного распределения Ri и полей трассера, плотности и скорости показывает, что центры возникающих вихрей располагаются в областях потенциальной неустойчивости течения.

4. Анализ результатов численного моделирования импульсных интрузионных течений, развивающихся в пикноклине, позволил установить следующие их особенности:

- Жидкость промежуточной плотности, поступившая в пикноклин за фиксированный промежуток времени Δt_0 , формирует пятно, растекающееся в дальнейшем в виде интрузионного течения в пикноклине. Течение имеет головную часть, форма которой близка к эллиптической, и почти однородную по плотности хвостовую часть меньшей толщины. Связь параметров затoka с размерами и формой пятна, образованного в результате затoka, можно охарактеризовать в терминах следующих безразмерных параметров: относительная толщина пикноклина β/H_0 (где H_0 – высота входного створа), начальное число Фруда $Fr_0 = U_0/U_w$ (где U_0 – средняя по пространству скорость затoka, $U_w = \sqrt{g' H_0}$) и характерный удельный объем затoka $\Delta t_0 U_0/H_0$. Этот набор безразмерных параметров удобен и для анализа более сложных интрузионных течений.
- Параметры интрузии, сформировавшейся к моменту завершения притока жидкости через входной створ, определяются параметрами затoka следующим образом: с ростом начального числа Фруда длина интрузии уменьшается, но растет ее вертикальный размер, а с ростом характерного удельного объема затoka происходит удлинение хвостовой части и увеличение объема головной.

- После окончания притока жидкости наблюдается квазистационарный режим распространения фронта. Число Фруда фронта стационарно распространяющейся интрузии ($Fr_H = U/U_w$, где U – стационарная скорость фронта) на этой стадии уменьшается с увеличением β/H_0 , начального числа Фруда Fr_0 и $\Delta t_0 U_0/H_0$, но уже при $Fr_0 > 1$ и $\Delta t_0 U_0/H_0 > 7$ скорость интрузии слабо зависит от этих параметров.
- Повторный заток может влиять на скорость продвижения фронта первой по времени возникновения интрузии. При тех же параметрах повторного затока, совершенного через небольшой промежуток времени Δt_1 , скорость фронта предыдущего течения (и Fr_H), возрастает, если Fr_0 и $\Delta t_0 U_0/H_0$ не превышают некоторых критических величин, т. е. если затоки не слишком интенсивные.
- Результаты численных экспериментов указывают на существенное влияние характера и величины пульсаций расхода источника на перемешивание внутри интрузионного плюма. Анализ переноса пассивной примеси в расчетах с различными Fr_0 , $\Delta t_0 U_0/H_0$, $\Delta t_1/\Delta t_0$ позволил обнаружить условия, при которых объем второго импульса распространяется быстрее и дальше в горизонтальном направлении за счет усиленного перемешивания с объемом первого.

5. Условия, при которых наблюдаются эффекты взаимодействия заток:

- Для роста Fr_H под действием второго затока необходимо, чтобы отношение времени между затоками к их продолжительности ($\Delta t_1/\Delta t_0$) не превышало единицы.
- При $Fr_0 > 1$ и $\Delta t_1/\Delta t_0 < 1$ в расчетах наблюдалось вторжение объема второго затока в головную часть первого, при $Fr_0 < 1$ и $\Delta t_1/\Delta t_0 < 1$ наблюдалось замедление горизонтального растекания интрузии от второго импульса. Расчеты с различными параметрами модели турбулентности позволили установить, что причиной замедления горизонтального распространения водной массы второго затока при небольших начальных числах Фруда является ее распространение в турбулентном следе первого.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исаченко И.А. О недостаточности простой модели турбулентной вязкости при исследовании стратифицированных по плотности течений / **И.А. Исаченко**, В.А. Гриценко // Естественные и технические науки. – 2014. – № 5 (73). – С. 146–152.
2. Исаченко И.А. Исследование скорости распространения конечного объёма жидкости по склону дна / **И.А. Исаченко**, В.О. Василькин, В.А. Гриценко // Естественные и технические науки. – 2015. – № 11. – С. 262–267.
3. Василькин В.О. Особенности движения конечного объёма солёной воды в окружении пресной воды на склоне дна / В.О. Василькин, **И.А. Исаченко**, В.А. Гриценко // Вестник БФУ им. И. Канта. – 2015. – № 4. – С. 36–44.
4. Чубаренко И.П. Формирование весеннего термоклина в прибрежной зоне юго-восточной Балтики по экспедиционным данным 2010–2013 гг. / И.П. Чубаренко, Н.Ю. Демченко, Е.Е. Есюкова, О.И. Лобчук, К.В. Карманов, В.А. Пилипчук, **И.А. Исаченко**, А.Ф. Кулешов, В.Я. Чугаевич, Н.Б. Степанова, В.А. Кречик, А.В. Багаев // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 5. – С. 702–709.
5. Исаченко И.А. Влияние пульсаций источника на структуру и внутреннюю динамику интрузионного течения / **И.А. Исаченко** // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2019. – Т. 12. – № 4. – С. 27–33.
6. Патент 151501 РФ, МПК В03В 5.40 (2006.01). Устройство формирования безымпulseсных придонных течений в гидрлотке / Гриценко В.А., Василькин В.О., **Исаченко И.А.**; Патентообладатель ФГАОУВПО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». – Заявка 2014130467/03, 22.07.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10. – 2 с.
7. Исаченко И.А. Об особенностях движения конечного объёма солёной воды в окружении пресной по склону дна / **И.А. Исаченко**, В.А. Гриценко // Процессы в геосредах. – 2016. – № 7. – С. 225–231.

8. Isachenko I. Numerical simulation of simultaneous collapse of two identical mixed regions in two layer fluid / **I. Isachenko** // Abstract book of BSSC 2013; August 26–30, 2013, Klaipeda, Lithuania. – 2013. – P. 183.
9. Isachenko I.A. On the features of dynamics and mixing in the propagation of density currents from a pulsed source / **I.A. Isachenko**, V.I. Bityutskiy, V.A. Gritsenko // Fluxes and structures in fluids: Proc. of Int. Conf; June 23–26, 2015, Kaliningrad. – 2015. – P. 103–106.
10. Vasilkin V.O. Study of motions of finite fluid volume on the slopes of bottom / V.O. Vasilkin, **I.A. Isachenko**, V.A. Gritsenko // Fluxes and structures in fluids: Proc. of Int. Conf; June 23–26, 2015, Kaliningrad. – 2015. – P. 263–265.
11. Исаченко И.А. Численное моделирование интрузионного течения от источника с переменным расходом / **И.А. Исаченко** // Волны и вихри в сложных средах: 6-я Международная научная школа молодых ученых; 21–23 июня 2015 г., Калининград: Сборник материалов школы. – 2015. – С. 101–104.
12. Исаченко И.А. Численное моделирование импульсных интрузионных течений / **И.А. Исаченко** // Сборник материалов. Международный симпозиум «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере». Посвящается 90-летию К.Н. Федорова (“МСП-2018”), Москва: ИО РАН, 30.10–2.11.2018 г. – Москва: ИО РАН, 2018. – С. 169–171.