

**Чебанова Марианна Кирилловна**

**ПРОЦЕССЫ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД И  
ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН В ЭСТУАРИЯХ**

**Специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва – 2016**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте водных проблем Российской академии наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией гидродинамики ИВП РАН  
**Зырянов Валерий Николаевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики моря и  
вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

**Показеев Константин Васильевич**

кандидат физико-математических наук, ст. н. с. лаборатории геомеханики Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского Российской Академии Наук (ИПМех РАН)

**Евгения Вячеславовна Степанова**

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии  
им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании Диссертационного  
совета Д.002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН. Отзывы на  
автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу:  
119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю  
диссертационного совета Д.002.040.01.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,

доктор геолого-минералогических наук, профессор



Р.Г. Джамалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Эстуарии - буферные зоны между пресными и морскими водными объектами с выраженным градиентом солености и изменчивым гидрологическим режимом [Hansen, Rattray, 1966]. Следствием динамического взаимодействия речной и морской водных масс являются процессы их взаимного проникновения, что находит свое отражение в структуре зоны смешения и приводит к возникновению циркуляционных течений, вызванных различием плотностей соленой и пресной водных масс [Hansen and Rattray, 1965, 1966; Fisher *et al*, 1979; Ippen and Harleman, 1961; Rigter, 1973; Abraham *et al*, 1975; Мак-Доуэлл, О'Коннор, 1983; Иппен, 1970; Savenije, 2005; Prandle, 2009; Лупачев, 1984].

На динамические процессы в эстуариях значительное воздействие оказывают приливы. Прилив в эстуариях приводит к интенсивному турбулентному перемешиванию вод, генерирует остаточную приливную циркуляцию [Fisher *et al*, 1979; Savenije, 2005; Abraham *et al*, 1975; Семенов, Лунева, 1996; Здоровеннов и др., 2001; Май, Фукс, 2005; Prandle, 2009]. В эстуариях наблюдается такой эффект, как «приливная накачка уровня», описанный в работах [Зырянов, Лейбо, 1985; Музылев и др., 1985; Лупачев, 1986; Зырянов, Музылев, 1988; Зырянов, 1995; Лапина, 2001; Зырянов, Хубларян, 2006] и оказывающий значительное влияние на остаточный транспорт наносов. Изучение трансформации приливов и процессов смешения речных и морских вод является одной из приоритетных задач при исследованиях эстуариев.

Математическое моделирование гидродинамики эстуариев осложняется изрезанностью береговой линии и их мелководностью, что делает обязательным учет турбулентного трения при изучении процессов в них. В большинстве случаев, в результате трения о дно происходит диссипация энергии входящей приливной волны и, как следствие, ее затухание [Зырянов, 1995]. Однако в некоторых эстуариях и заливах прилив может достигать 5-7 м (Мезенский залив Белого моря) и даже 14 м (заливы

Фанди и Унгава). Изучение явления аномального увеличения амплитуды прилива в различных заливах и эстуариях – еще одна интересная задача, возникающая при изучении приливной динамики в эстуариях.

Для эстуариев характерно особое гидрологическое явление – проникновение морских вод в устья рек в виде клина осолоненных вод. Данное явление нередко приводит к попаданию соленых вод в водозаборы, к осолонению поверхностных и подземных вод, воздействию на пресноводную биоту. Соленостный клин может стать препятствием на пути перемещения наносов и вызвать заиливание судоходных каналов. Дальнейшее исследование этого процесса и разработка более совершенных моделей, позволяющих рассчитывать глубину проникновения соленых вод в устья рек, очень актуальны и в настоящее время.

Эстуарии являются зонами транзита терригенного и органического осадка с материка в океан. Здесь взвешенные и растворенные вещества аккумулируются и сильно трансформируются, благодаря чему создаются и поддерживаются весьма специфические условия для жизни многих организмов [Лисицын, 1994]. Таким образом, эстуарии являются своеобразным фильтром на пути загрязненного материкового стока, при этом оставаясь продуктивными и доступными для эксплуатации зонами Мирового океана. Все это делает эстуарии важными и востребованными объектами для изучения.

**Целью данной работы** является изучение гидродинамических особенностей зоны смешения речных и морских вод в эстуариях и трансформации входящих в них со стороны моря приливных волн.

В работе ставились следующие **задачи**:

1. Изучить основные закономерности зоны взаимодействия речных и морских вод на примере устья реки Кеми Белого моря;
2. Усовершенствовать гидродинамическую теорию интрузии морских вод в устья приливных рек с использованием экспериментальных данных по устью реки Кеми;

3. Исследовать роль морфометрии заливов в динамике входящих приливных волн – эффектов схождения берегов (эффект конфузора) и уменьшения глубин;

4. Провести лабораторное моделирование влияния вращения Земли на эволюцию длинных волн в изогнутых бухтах: с левым (по направлению вращения Земли) и правым (против вращения Земли) загибом.

**Научная новизна.** Исследованы закономерности перемешивания морских и речных вод в мало изученном мелководном эстуарии р. Кеми, выявлены некоторые интересные особенности взаимодействия морских и речных вод: форма клина морских вод; крупномасштабная ступенчатая структура вертикальных распределений температуры, солености, плотности; волновые колебания солености в придонной области.

В работе развита гидродинамическая теория, которая позволила объяснить выявленные закономерности.

Предложена методика определения толщины клина морских вод в устьевом створе, с помощью которой можно определять этот параметр аналитически, а не эмпирически или по данным наблюдений, как это обычно принято в таких задачах.

Объяснено «странное» поведение приливной волны в некоторых бухтах, при котором сначала, при входе в эстуарий, амплитуда приливной волны уменьшается, а затем, по мере продвижения волны вглубь, начинает вновь увеличиваться.

Показано, что усиление амплитуды приливной волны при вхождении в воронкообразные бухты может быть вызвано не резонансом с сейшевыми волнами, а эффектом конфузорности.

**Материалы и методы исследований.** Для изучения процессов смешения речных и морских вод в эстуарии р. Кеми в работе были использованы натурные данные, полученные ИВПС КарНЦ РАН в ходе экспедиций: 7 - 13 июля 2008 года, 14 - 18 июля 2009 г., 01 - 05 августа 2010 г. и 15 - 16 июля 2011г. Для расчетов годового и сезонного стока рек при

анализе глубины проникновения соленой воды в устья использовались данные многолетних наблюдений ИВПС КарНЦ РАН, а также данные ГГИ, находящиеся в открытом доступе. Для построения карт и разрезов использовались программы Surfer 11 и Sigma Plot 11. Все математические расчеты и построение графиков осуществлялись в программе Matlab 6.1.

**Практическая значимость.** К настоящему моменту в исследованиях динамики эстуариев на фоне большого количества работ по численному моделированию обозначилась явная недостаточность аналитических результатов. Гидродинамическая теория, изложенная в данной работе, учитывает мелководность эстуария и, как следствие, эффект турбулентного трения, что позволяет объяснить некоторые закономерности перемешивания вод, особенности вхождения приливных волн в бухты. Полученные результаты могут быть использованы для расчетов дальности проникновения морских вод в устья рек, тестирования численных моделей. Исследования относятся к области рационального природопользования – приоритетного направления развития науки в РФ.

**На защиту выносятся:**

- Усовершенствованная гидродинамическая модель интрузии морских вод в устья рек с методикой аналитического определения толщины клина морских вод в устьевом створе;
- Гидродинамические основы формирования крупномасштабных ступенек и волн в зоне взаимодействия речных и морских вод;
- Результаты исследований эффекта схождения берегов (эффект конфузора), эффекта турбулентного трения, роли форм рельефа дна и слоя Стокса в динамике трансформации приливных волн в эстуариях;
- Результаты лабораторного моделирования влияния вращения Земли на трансформацию приливов в изогнутых бухтах.

**Защищаемые положения.**

- Толщина клина морских вод в устьевом створе определяется удельным расходом реки и углом расхождения берегов эстуария. Предложен

новый гидрофизический параметр, с помощью которого можно определять толщину соленостного клина в устьевом створе;

- Крупномасштабные ступеньки на вертикальных профилях солености, зафиксированных в эстуарии р. Кемь, обусловлены приливным перемещением слоя смешения речных и морских вод на границе соленостного клина;

- По особенностям трансформации приливных волн при вхождении в бухту они делятся на глубоководные, мелководные и «странные». Основную роль в этом играет слой Стокса и отношение его толщины к глубине эстуария;

- Морфометрия эстуариев и заливов (профиль дна, изменения углов схождения берегов) играет существенную роль в трансформации приливных волн;

- Причиной различия величин приливов в бухтах с левым и правым загибом является вращение Земли, что подтверждено лабораторными экспериментами.

**Апробация работы.** Основные результаты, изложенные в данной работе, докладывались на Международном семинаре с полевым выездом «Трансграничные водосборы: Финляндия и Россия – водосбор Белого моря» с экспедицией на Белое море и сессией для молодых ученых (Карелия, о-в Тонисоар, 2013); VII международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2013); 12-й международной конференции «Государственное управление» Российская Федерация в современном мире» (Москва, 2014); международной школе-конференции «White sea international student workshop on optics of coastal waters» (Беломорская биологическая станция (ББС) МГУ, 2014); Международной молодежной школе-конференции «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии» (Петрозаводск, 2014); Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской

Федерации до 2020 г.» (Петрозаводск, 2015); 4-й международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2015» (Москва, 2015); Международной научной школе молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2015).

Исследования, изложенные в данной работе, получили поддержку РФФИ, грант № 16 – 35 – 00344 мол\_а.

**Личный вклад автора.** Автор непосредственно участвовал во всех этапах диссертационной работы: обработке и анализе натурных данных, построении графиков, написании программ и выполнении необходимых численных расчетов в пакете Matlab, в подготовке и проведении лабораторного эксперимента, а также в обсуждении и интерпретации полученных результатов. Автор участвовал в подготовке результатов к опубликованию в журналах, а также представлял их на конференциях. По теме работы было принято участие в экспедиции научно-студенческого общества НСО-2014 на Беломорскую биологическую станцию МГУ им. Н.Перцова, 26.01.2014-06.02.2014.

**Благодарности.** Автор выражает признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н., проф. В.Н. Зырянову, а также коллективу лаборатории гидродинамики ИВП РАН за всестороннюю помощь и поддержку при работе над диссертацией. Автор также благодарит сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС РАН) и лично чл.-корр. РАН, д.г.н., проф. Н.Н. Филатова и к.г.н. А.В. Толстикова за любезно предоставленные данные наблюдений.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, включающего в себя 215 наименований, из них 113 на иностранных языках. Полный объем диссертации — 153 страницы, включая 65 рисунков и 7 таблиц.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель, задачи и основные защищаемые положения диссертации, охарактеризованы практическая значимость и научная новизна, приведен список работ по теме диссертационной работы, указан личный вклад автора и апробация результатов исследования.

**Первая глава** имеет обзорный характер. В **разделе 1.1.** представлены общие сведения об особенностях гидрологического режима эстуариев, обобщены сведения о процессах смешения речных и морских вод и турбулентного обмена. В **разделе 1.2.** изложены основные существующие подходы к расчету дальности проникновения соленых вод, дана характеристика и оценка применимости моделей расчета интрузии морских вод. **Раздел 1.3.** посвящен динамике приливных волн в эстуариях: описаны основные закономерности трансформации длинных волн в прибрежных зонах и дан краткий обзор основных подходов, использующихся при их изучении.

Во **второй главе** изучены основные закономерности перемешивания вод в зоне смешения эстуария реки Кемь, приведены результаты обработки натурных данных, собранных ИВПС КарНЦ РАН по итогам четырехлетних наблюдений. В **разделе 2.1.** показано, что эстуарий реки Кемь относится к сильно стратифицированным эстуариям с клином соленых вод. По данным наблюдений обнаружено, что поверхность клина морских вод имеет форму кривой с разными знаками кривизны. Из анализа вертикальных разрезов солености по направлению от мористой части к устью и карт распределения солености в поверхностном слое в эстуарии реки Кемь в соответствии с относительной ролью приливо-отливных течений и речного стока выделены три зоны: приустьевая зона с преобладанием речной водной массы, слабо подверженная воздействию морских вод, переходная зона смешения речных и морских вод и мористая зона с преобладанием морских вод, подверженная незначительному влиянию речного стока. Приведены графики вертикального

распределения температуры и солености (рисунок 1) по глубине за приливной цикл, графики суточного хода таких параметров, как придонная и поверхностная соленость, температура, параметр стратификации, уровень поверхности и мощность клина. Описаны особенности стратификации водной толщи. В **разделе 2.2.** описаны основные закономерности процессов турбулентного перемешивания, показано, что периодическое появление крупномасштабной ступенчатой структуры на вертикальных профилях

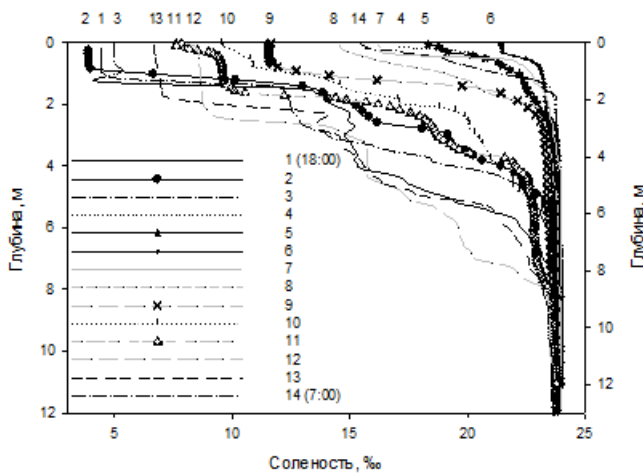


Рисунок 1 – Вертикальное распределение солености в зоне смешения р. Кемь на каждый час приливо-отливного цикла

солености (рисунок 1) может быть обусловлено формированием слоя смешения на границе речных и морских вод и его перемещением с приливом. **Раздел 2.3.** посвящен внутренним волнам на границе соленостного клина, обнаруженным при

анализе графиков суточного хода придонной солености. Существование долгопериодных волновых колебаний в придонной области, частоты которых оказались вне диапазона внутренних волн в идеальной жидкости, удалось объяснить с помощью вязкой теории волновых колебаний в двухслойной жидкости, развитой в работе [Зырянов, 1987]. В **разделе 2.4.** на основании анализа графиков суточного хода скорости и направления течений на суточной станции в зоне смешения в эстуарии реки Кеми дана характеристика поля течений; показано, что из-за неоднородности поля плотности и воздействия приливо-отливных течений в эстуарии реки Кеми формируется типичная для эстуариев двухслойная циркуляция вод, при которой результирующие течения в верхнем слое направлены в сторону моря, а в нижнем слое – в сторону реки. Анализ приведенных в разделе

графиков показал, что трансформация приливной волны в мелководном эстуарии реки Кеми имеет нелинейный характер, и продолжительность приливного течения оказывается на 1,5 – 2 часа меньше отливного. В **разделе 2.5.** по максимуму в поле мутности определяется положение маргинального фильтра в эстуарии реки Кеми, которому соответствуют максимумы спада солености и показателя стратификации; описаны некоторые характерные особенности динамики взвешенных наносов в зоне смешения в эстуарии реки Кеми.

В **третьей главе** рассмотрена задача интрузии морских вод в устье реки в условиях сильной стратификации. В **разделе 3.1.** приводится постановка задачи. Динамика двухслойной жидкости на наклонной плоскости в условиях слабого перемешивания между слоями в устье реки при глубине меньше критической (градиентно-вязкий режим течения) описывается системой нелинейных уравнений параболического типа для колебаний свободной поверхности воды  $\zeta(x,t)$  и толщины слоя морских вод  $\eta(x,t)$  [Зырянов, 1987]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{g}{3A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ (H - \zeta)^3 \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \operatorname{tg} \theta \right) - 6\delta \frac{\partial \eta}{\partial x} \left( \frac{H\eta^2}{2} - \frac{\eta^3}{3} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{2g\delta}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta^3 \left( \frac{2}{3} - \frac{\eta}{2H} \right) \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{1}{\delta} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \operatorname{tg} \theta \right) \left( \frac{H\eta^2}{2} - \frac{\eta^3}{3} \right) \right], \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $A$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $H(x)$  – рельеф дна,  $\theta$  – угол уклона уровня реки,  $\delta = (\rho_S - \rho_R) / \rho_R$ ,  $\rho_S$  – плотность морской воды,  $\rho_R$  – плотность речной воды. Начало координат расположено на невозмущенной поверхности водоема.

Тангенс угла наклона свободной поверхности реки  $\operatorname{tg} \theta$  связан с удельным расходом реки (полный поток)  $S_R$  и ее средней глубиной  $H_0$  соотношением [Зырянов, 1987]:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{3A}{gH_0^3} S_R. \quad (3)$$

Полную систему уравнений (1), (2) удастся решить только численными методами [Зырянов, 1987]. В стационарном случае система (1), (2) допускает упрощения, и тогда можно при некоторых предположениях найти аналитическое решение в неявном виде для формы соленостного клина:

$$x = \frac{1}{4R} \left[ \frac{1}{2}(q_0^4 - q^4) - (q_0^3 - q^3) + \frac{3}{4}(q_0^2 - q^2) + \frac{1}{4}(q_0 - q) + \frac{3}{8} \ln \frac{3-2q_0}{3-2q} \right], \quad (4)$$

где  $q = \eta/H$ ,  $R = \frac{3AS_R}{4g\delta H^4}$ ,  $q|_{x=0} = q_0 = D/H$ ,  $D$  - толщина соленостного клина в устьевом створе. Дальность проникновения морских вод в устье реки (длина клина) получается из (4) при  $q = 0$ .

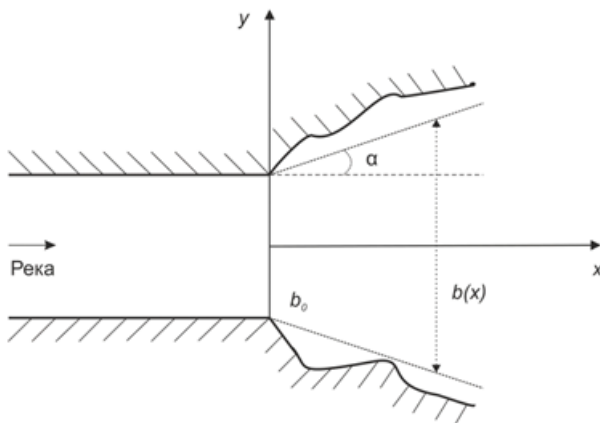
В **разделе 3.2.** предложена методика аналитического определения толщины клина морских вод в устьевом створе. Используя идею сопряжения расхода реки в устьевом створе со стороны реки и эстуария и аппроксимируя начальную зону растекания речных вод усеченным угловым сектором, как показано на рисунке 2, получим уравнение для  $q_0$  в устьевом створе:

$$q_0(1 - q_0)^3 = P(3 - 2q_0), \quad (5)$$

где

$$P = \frac{3AV_R b_0}{4\delta(2\gamma g H^3 + 3AV_R b_0)}. \quad (6)$$

В уравнении (6)  $V_R$  - средняя скорость реки,  $Q_R$  - полный расход реки,



$h(x)$  - толщина речного потока в плюме,  $\gamma = \text{tg } \alpha$ , где  $\alpha$  - угол бокового растекания,  $b_0$  - ширина реки в устьевом створе.

Уравнение (5) решалось графически, и, исходя из физических соображений, из двух ветвей корней уравнения выбиралась вторая  $q_0^{(2)} = f_2(P)$ ,

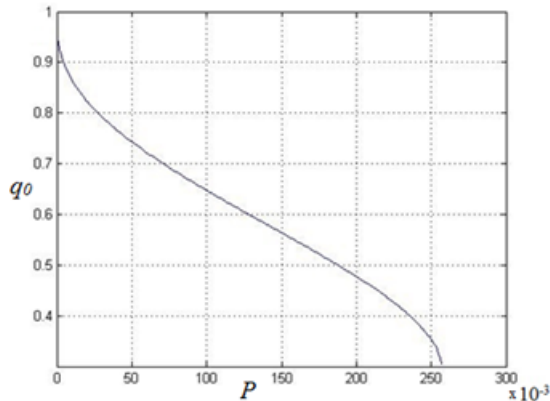
Рисунок 2 - Схема зоны устьевых створов в плане

представленная на рисунке 3. Для того чтобы найти толщину клина морских

вод в устьевом створе реки необходимо вычислить для данной реки параметр  $P$  по (6) и далее по этому значению  $P$  из графика на рисунке 3 определить  $q_0$ .

В разделе предложена формула для толщины клина в устьевом створе, как аналог формулы Кейлегана:

$$q_0 = D/H = f_2(P). \quad (7)$$



Параметр  $P$ , рассчитываемый по формуле (6), может использоваться для характеристики процессов смешения в сильно стратифицированном эстуарии наравне с прочими гидрофизическими параметрами. С помощью

Рисунок 3 – График корней уравнения (5)  $q_0^{(2)} = f_2(P)$

параметра  $P$  можно аналитически определять толщину соленостного клина – характеристику, необходимую для расчета интрузии соленых вод в устья рек.

В **разделе 3.3.** представлен результат расчета клина морских вод по вышеизложенной теории для устья реки Кеми (рисунок 4). Дальность проникновения морских вод в устье реки определяется полным выклиниванием морских вод, т.е. нулевым значением толщины нижнего слоя  $\eta = 0$ . Расчетные результаты сопоставлялись с данными наблюдений. Сравнение реального хода изогалин и рассчитанной по формуле (4) формы соленостного клина (рисунок 4) дает возможность сделать вывод, что развитая теория дает более сложную форму соленостного клина, нежели в [Зырянов, 1987]. Показано, что поверхность клина не обязательно должна быть выпуклой, а может состоять из участков с разными знаками кривизны, что и было замечено во время экспериментальных работ в устье р. Кеми.

Увеличение длины клина за счет приливной накачки – пампинг-эффекта (эффекта повышения/понижения среднего значения описываемой

физической характеристики на бесконечности относительно среднего значения этой характеристики на границе области для колебательных процессов, описываемых нелинейными уравнениями параболического типа) для устья р. Кемь составляет 36 см. Такое увеличение толщины головной части клина дает прибавку к глубине интрузии вод на величину порядка 100м.

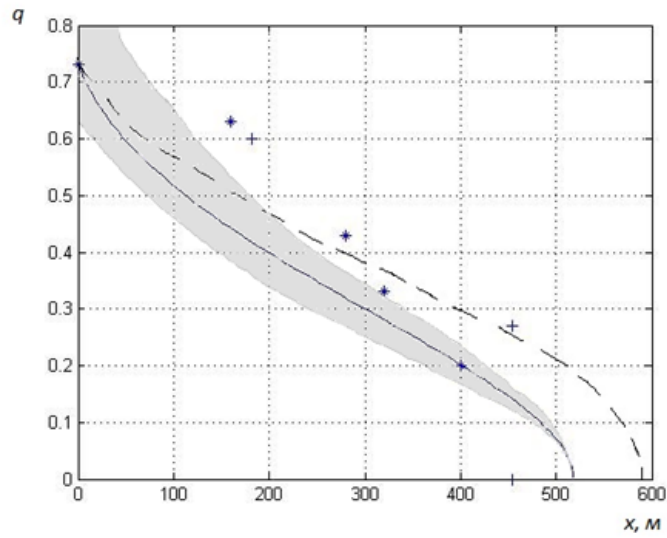


Рисунок 4 – Теоретическая форма клина по формуле (4) – сплошная линия. Пунктир – среднее положение клина за приливной цикл с учетом пампинг-эффекта. Значками (\*, +) показано положение изогалины 6‰, полученное по данным наблюдений, во время прилива и отлива, соответственно. Штриховкой показан слой смешения, образующийся на поверхности раздела

В разделе также приведены результаты расчета формы и длины клина для случаев максимального и минимального расхода. В **подразделе 3.3.1.** выполнена оценка подвижности носика клина, показано, что носик клина в устье р. Кемь является подвижным и перемещается вместе с приливом.

В **разделах 3.4. и 3.5.** приведены результаты расчетов формы и длины клина для устьев рек Кереть и Онега соответственно. Расчетное положение дальности проникновения морских вод в устья рек сопоставлялось с данными по литературным источникам.

**Четвертая глава** посвящена трансформации приливных волн в эстуариях. В главе исследуются роли противоположно действующих эффектов – гидродинамического эффекта конфузора (эффекта сближения

берегов по ходу распространения приливной волны в залив) и эффекта турбулентного трения, обусловленного мелководностью эстуариев. Дан обзор заливов и эстуариев, где наблюдается значительное увеличение амплитуды приливной волны. В **разделе 4.1.** рассматривается постановка задачи для морского залива, в который входит приливная волна. Задача ставится для однородной по плотности воды в пренебрежении нелинейными членами и ускорением Кориолиса. В результате исходная система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \quad (9)$$

$$g\rho_0 = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

где  $u, v$  – горизонтальные составляющие скорости течения соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ,  $w$  – вертикальная составляющая скорости течения,  $P$  – давление в жидкости. Ось  $Z$  направлена вертикально вниз. Начало координат расположено на невозмущенной поверхности водоема. Граничными условиями на поверхности моря  $z = \zeta(x, y, t)$  ставятся условие отсутствия ветра и кинематическое условие:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=\zeta} = \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=\zeta} = 0; \quad w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u|_{z=\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v|_{z=\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y}; \quad (12)$$

на дне  $z = H(x, y)$  условия прилипания:

$$u|_{z=H} = v|_{z=H} = w|_{z=H} = 0; \quad (13)$$

на береговой границе водоема  $L(x, y)$  – равенство нулю интегрального расхода (полного потока) по нормали  $\vec{n}$  к границе

$$(\vec{S}, \vec{n}) = 0, \quad \text{где } \vec{S} = \int_{\zeta}^H \vec{U} dz, \quad \vec{U} = (u, v). \quad (14)$$

Граничные условия на свободной поверхности линеаризуются. Ищутся волновые решения системы (8) – (11) в виде:

$$u = \bar{u}e^{i\omega t}, \quad v = \bar{v}e^{i\omega t}, \quad \zeta = \bar{\zeta} e^{i\omega t},$$

где  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  – амплитуды волновых колебаний скорости,  $\bar{\zeta}$  – амплитуда колебаний уровня,  $\omega$  – частота волны.

После преобразований получено основное уравнение для амплитуды колебаний уровня воды в водоеме:

$$\frac{\partial}{\partial x} [(g\bar{\zeta}_x)\tilde{H}] + \frac{\partial}{\partial y} [(g\bar{\zeta}_y)\tilde{H}] + \omega^2\bar{\zeta} = 0, \quad (15)$$

где

$$\tilde{H} = H - \frac{1}{\lambda} \text{th}(\lambda H) \quad (\text{редуцированная глубина}). \quad (16)$$

Параметр  $\lambda$  в (16) – комплексное число

$$\lambda = \sqrt{\frac{i\omega}{A}} = \sqrt{\frac{\omega}{2A}}(1+i) = \alpha(1+i), \quad \text{где } \alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2A}}. \quad (17)$$

Величина  $h_{St} \sim \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2A}{\omega}}$  есть не что иное, как слой Стокса, и по

отношению его толщины к глубине эстуария режимы течения делятся на вязкий ( $H < h_{St}$ ) и слабовязкий ( $H > h_{St}$ ). Редуцированная глубина  $\tilde{H}$  меньше реальной  $H$  на толщину слоя Стокса, поэтому фазовая скорость приливных волн на мелководье в действительности будет меньше, нежели по расчетам по формуле Лагранжа – Эри.

В **разделе 4.2.** эстуарий аппроксимируется угловым сектором с координатами  $(r, \varphi)$ , где  $r$  – расстояние от вершины эстуария, а  $\varphi$  – полярный угол. После осреднения по  $\varphi$  получено основное уравнение для уровня в полярных координатах  $(r, \varphi)$ :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \langle \tilde{H}(r, \varphi) \rangle \frac{\partial \langle \bar{\zeta} \rangle}{\partial r} \right) + \frac{\omega^2}{g} \langle \bar{\zeta} \rangle = 0, \quad (18)$$

где угловые скобки означают осреднение по углу  $\varphi$ .



Граничные условия: в вершине эстуария ( $r=0$ ) задается равенство нулю полного потока, а на внешней мористой границе эстуария ( $r=R$ ) – амплитуда приходящей приливной волны, т.е.:

$$\left. \frac{d\zeta}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \zeta|_{r=R} = \zeta_0. \quad (19)$$

Сначала рассматривается случай эстуария постоянной глубины  $\tilde{H}(r) = \tilde{H}_0$ . Решение уравнения (18) выписывается в функциях Бесселя, и при аппроксимации эстуария угловым сектором получим:

$$\zeta = C J_0(kr), \quad (20)$$

а при аппроксимации эстуария усеченным сектором с границами  $r=r_0$  и  $r=R$  с учетом граничных условий:

$$\zeta = C_1 \left[ J_0(kr) - \frac{J_1(kr_0)}{N_1(kr_0)} N_0(kr) \right], \quad (21)$$

где  $k = \sqrt{\frac{\omega^2}{g\tilde{H}_0}}$ ,  $J_0, J_1$  – функции Бесселя нулевого и первого порядков,  $N_0, N_1$  – функции Неймана соответствующих порядков,  $C, C_1$  – константы интегрирования.

В расчетах константы  $C, C_1$  полагались равными 1, т.к. амплитуда колебания уровня  $\zeta$  обезразмеривалась на амплитуду прилива  $\zeta_0$  в вершине эстуария.

Рассчитаны первые моды сейшевых колебаний в клиновидном эстуарии. Показано, что при глубинах больших слоя Стокса на форму сейшевых волн основное влияние оказывает эффект конфузурности эстуария – амплитуды сейшевых колебаний в вершине эстуария существенно больше амплитуд сейш на входе в эстуарий. Однако если глубина в эстуарии непостоянна и уменьшается в вершине эстуария, то асимметричность сейш может оказаться обратной – на входе в эстуарий амплитуда сейш может быть больше, нежели в его вершине из-за действия трения.

Результаты расчета эволюции прогрессивной волны в эстуарии с периодом первой моды сейшевых колебаний показывают, что в случае резонансного усиления колебания имеют вид квазистоячих волн, т.е. почти сейшевых волн, и амплитуда колебаний в вершине эстуария увеличивается в 2.5 раза по отношению к амплитуде входящей волны. Из расчета периода первой моды сейшевых колебаний для залива Фанди видно, что резонанс с полусуточным приливом отсутствует, и в усилении амплитуды прилива в вершине залива главную роль должен играть эффект конфузора, а не резонансное усиление, как это часто утверждается в океанографической литературе. На это еще накладывается эффект нелинейности, который в данной постановке задачи не учитывался.

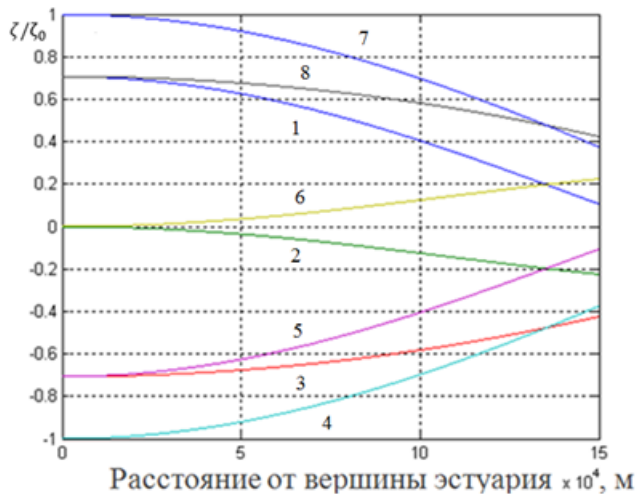


Рисунок 5 – Приливные колебания уровня моря  $\zeta/\zeta_0$  в глубоководном эстуарии при  $H = 20$  м. Даны положения уровня через  $1/8$  периода волны, начиная с  $\pi/4$  (1)

увеличивается из-за действия эффекта конфузора (рисунок 5), а при глубинах, меньших, чем толщина слоя Стокса, турбулентное трение становится преобладающим над эффектом конфузора, и амплитуда приливной волны уменьшается при продвижении к вершине эстуария (рисунок 6).

При глубинах порядка толщины слоя Стокса имеет место промежуточный случай («странные» бухты), при котором на входе в

Результаты расчета эволюции прогрессивных волн в эстуариях с постоянными глубинами (рисунки 5 – 7) показывают, что при глубинах, существенно больших толщины слоя Стокса ( $H \sim 15$  м равна толщине слоя Стокса для полусуточной приливной волны), амплитуда приливной волны при входе в воронкообразный эстуарий

эстуарий больше проявляется эффект трения, и амплитуда приливной волны начинает уменьшаться, а по мере продвижения волны вглубь эстуария

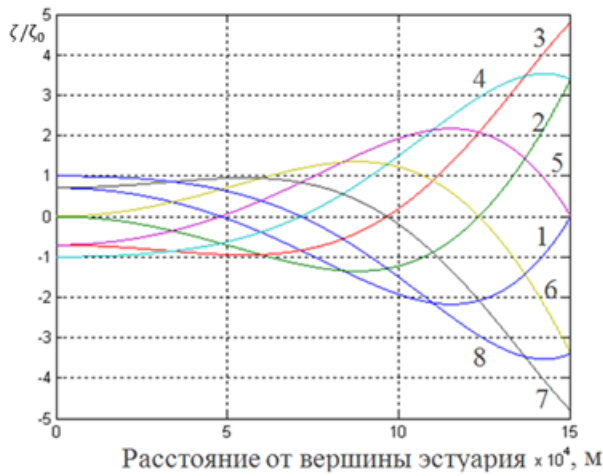


Рисунок 6 – Приливные колебания уровня моря  $\zeta/\zeta_0$  в мелководном эстуарии при  $H = 7$  м. Положения уровня моря за период прилива через 1/8 периода, начиная с  $\pi/4$  (1)

начинает превалировать эффект конфузора, и амплитуда приливной волны начинает вновь увеличиваться (рисунок 7).

Для эстуария переменной глубины  $\tilde{H}(r)$  удается найти аналитическое решение уравнения (18), аппроксимировав действительную часть  $\text{Re}(\tilde{H}(r))$  степенной функцией:

$$\text{Re}(\tilde{H}(r)) = H(r) = H_0 r^{-2\alpha}. \tag{22}$$

Тогда уравнение (18) сводится к уравнению Ломмеля. На рисунке 8 приведен результат решения уравнения Ломмеля для двух случаев аппроксимации  $\text{Re}(\tilde{H}(r))$  степенной функцией при  $\alpha = -\frac{1}{3}$  и  $\alpha = -\frac{3}{5}$ , а на рисунке 9 – численное решение уравнения (18) для параболического профиля глубин. Показано, что в случае

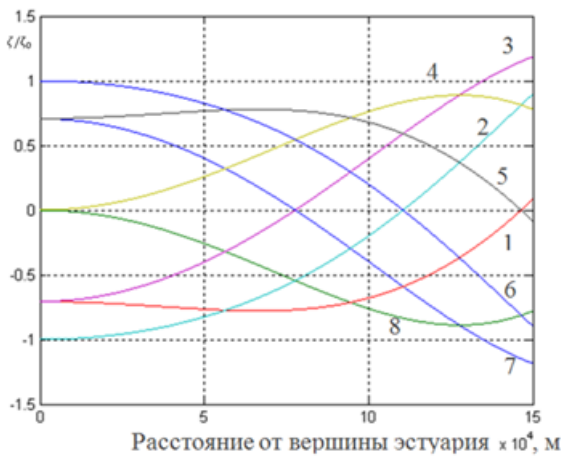


Рисунок 7 – Колебания уровня  $\zeta/\zeta_0$  в эстуарии при  $H = 10$  м. Положения уровня моря за период прилива через 1/8 периода, начиная с  $\pi/4$  (1)

выпуклого вверх профиля дна усиление волн в вершине эстуария больше, нежели для случая вогнутого профиля дна.

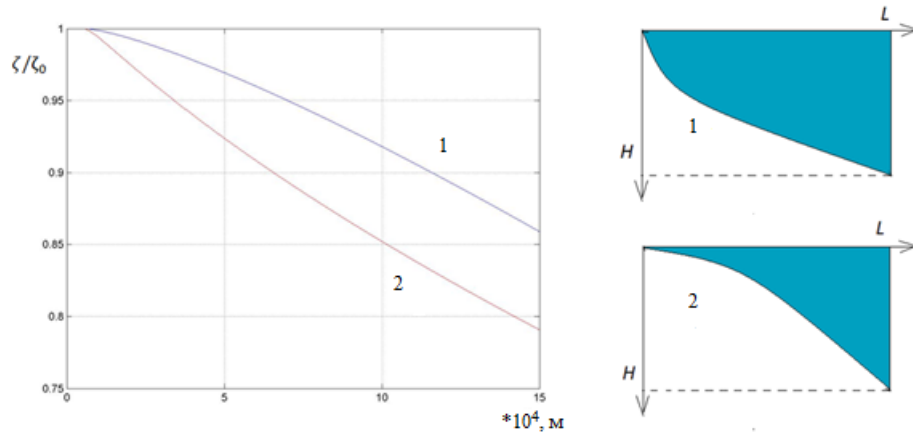


Рисунок 8 – Решения уравнения Ломмеля: 1 – при  $\alpha = -1/3$ ; 2 – при  $\alpha = -3/5$

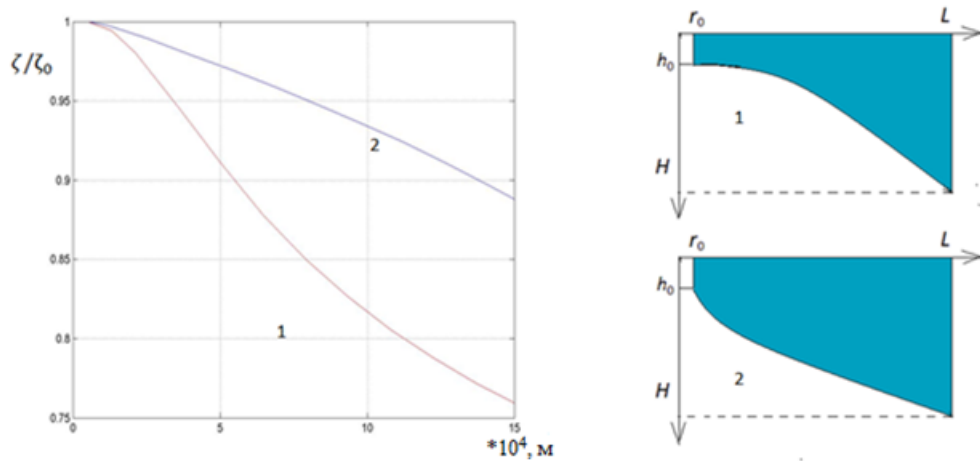


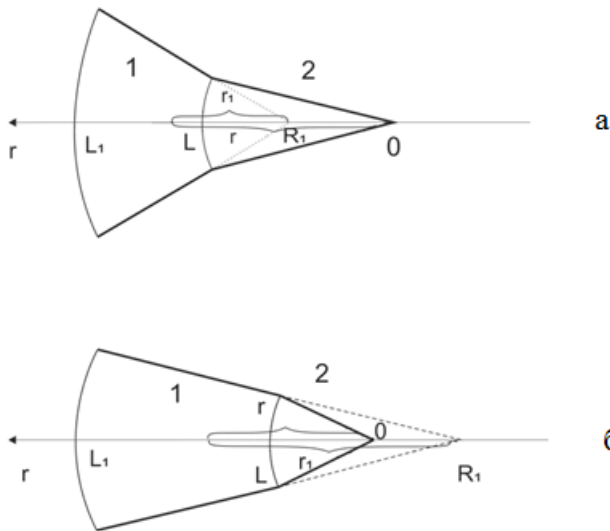
Рисунок 9 – Численное решение уравнения (18) для амплитуды волны с параболическим профилем глубин при  $H(L) = 150\text{м}$ ;  $H(r_0) = 10\text{м}$ ;  $r_0 = 5 \cdot 10^3\text{м}$ ;  $L = 150 \cdot 10^3\text{м}$ :

1 – выгнутый вверх профиль дна; 2 – выгнутый вниз профиль дна

В **разделе 4.3** изучается промежуточный случай, названный в работе «странные бухты», при котором амплитуда приливной волны при вхождении в эстуарий сначала уменьшается, а затем вновь начинает возрастать к вершине. Показано, что существует расстояние от вершины бухты  $R_c = \frac{1}{2k_i(H)}$ , где  $k_i(H) = \text{Im}(k) = \frac{\omega \text{Im}(\tilde{H})}{2 \text{Re}(\tilde{H}) \sqrt{g \text{Re}(\tilde{H})}}$ , при котором амплитуда волны в конфузоре имеет минимум. Если точка  $R_c$  лежит за пределами эстуария, то преобладает эффект конфузора, и высота волны увеличивается к вершине. Если точка  $R_c$  оказывается вблизи вершины эстуария, то на всем протяжении бухты превалирует эффект турбулентного трения, и высота волны

уменьшается к ее вершине. И, наконец, если точка  $R_c$  находится во внутренней области эстуария, то возникает случай «странной бухты» - высота волны до точки  $R_c$  уменьшается, а после прохождения точки  $R_c$  начинает вновь возрастать.

В **разделе 4.4.** рассматривается случаи двухконфузорного эстуария постоянной глубины и со скачком глубин.



Рассматриваются два случая: вогнутый внутрь и выпуклый наружу конфузоры, как показано на рисунке 10. Решение для внешнего выражается в полярных координатах  $(r, \varphi)$  с полюсом в  $R_1$ , а для внутреннего конфузора – в полярных координатах  $(r, \varphi)$  с полюсом в нуле.

Рисунок 10 – Аппроксимация эстуария двойным конфузором.

а – вогнутый внутрь; б – выпуклый наружу конфузоры.

1 – внешний конфузор; 2 – внутренний конфузор

Решение для амплитуды волны выписывается в функциях Бесселя:

для конфузора 1

$$\zeta_1(r) = C_1 J_0[k_1(r - R_1)] + C_2 N_0[k_1(r - R_1)], \quad (23)$$

для конфузора 2

$$\zeta_2(r) = C_3 J_0(k_2 r), \quad (24)$$

где

$$k_1 = \sqrt{\frac{\omega^2}{gh_1}}; \quad k_2 = \sqrt{\frac{\omega^2}{gh_2}},$$

$h_1, h_2$  - глубины в конфузорах 1, 2 соответственно.

Результаты расчетов увеличения амплитуды волны в двухконфузорном эстуарии по отношению к амплитуде волны на входе приведены на рисунке 11. Из рисунка видно, что в двухконфузорной бухте 2-ого типа (выпуклой

наружу) высота приливной волны больше. Излом на графиках соответствует границе стыковки конфузоров, где происходит скачок глубин.

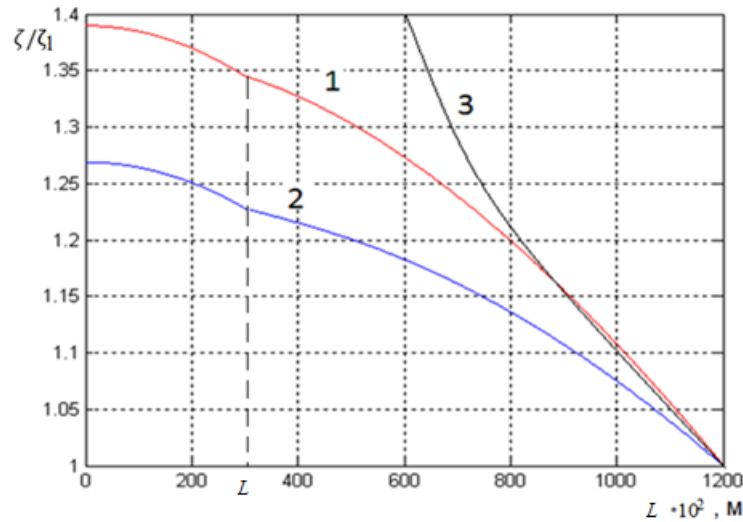


Рисунок 11 – Амплитуда колебаний уровня в двухконфузорной бухте при:  
 $h_1 = 30$  м,  $h_2 = 15$  м,  $L_1 = 120$  км,  $L = 30$  км,  $R_1 = -20$  км (1) (выпуклый наружу),  
 $R_1 = 20$  км (2) (вогнутый внутрь конфузор), невязкая жидкость (3)

На рисунке 12 показаны результаты расчетов периодов сейшевых колебаний в двухконфузорной бухте. Периоды сейшевых колебаний находились как корни детерминанта системы уравнений для определения констант  $C_1, C_2$  и  $C_3$  ( $\det(B)$ ). Период первой моды сейш в вогнутой внутрь ( $T_1$ ) бухте оказался меньше, нежели в выпуклой ( $T_2$ ).

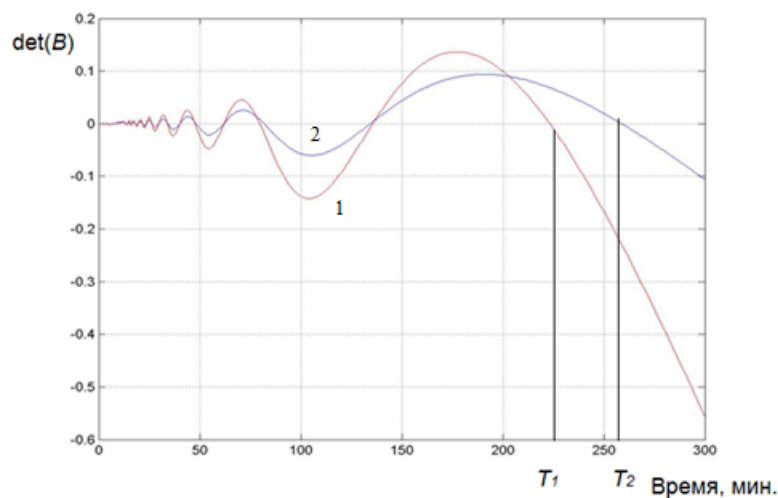


Рисунок 12 – Периоды сейшевых колебаний (нули графиков) в двухконфузорной бухте при  $h_1 = 50$  м,  $h_2 = 15$  м,  $L_1 = 120$  км,  $L = 40$  км,  $R_1 = 20$  км (1) (вогнутый внутрь конфузор),  $R_1 = -20$  км (2) (выпуклый конфузор)

В **разделе 4.5.** описан лабораторный эксперимент, целью которого было исследовать влияние вращения Земли и загиба бухт на увеличение амплитуды прилива. Рассмотрены бухты с загибом по направлению вращения Земли (левые бухты) и с загибом против направления вращения Земли (правые бухты). Аналитически эти исследования провести не удалось, т.к. такую задачу необходимо рассматривать в нелинейной постановке, поэтому были проведены лабораторные эксперименты на вращающейся установке, в которой приливная волна генерировалась волнопродуктором. Период движения волнопродуктора задавался совпадающим с периодом вращения установки. Таким образом, моделировалась суточная приливная волна. Слой воды наливался из расчета генерации в банке первой моды сейшевых колебаний, который бы совпадал с периодом вращения банки. Это необходимо для создания симметричных условий для волн в левой и правой бухтах. В результате эксперимента было получено, что вращение Земли вносит существенный вклад в возникновение асимметрии левых и правых бухт для приливных волн. Эта асимметрия в работе объясняется на основе закона сохранения потенциального вихря для вращающейся жидкости.

В **выводах** сформулированы основные результаты, полученные в работе:

- Смещение морских и речных вод в эстуарии реки Кемь происходит по типу клина осолоненных вод по классификации Притчарда. В соответствии с относительной ролью приливо-отливных течений и речного стока в эстуарии реки Кемь выделены три зоны: приустьевая зона с преобладанием речной водной массы, слабо подверженная воздействию морских вод, переходная зона смешения речных и морских вод и мористая зона с преобладанием морских вод, подверженная незначительному влиянию речного стока.
- Периодическое появление крупномасштабных ступенек на вертикальных профилях солености, зафиксированных в эстуарии р. Кемь,

обусловлено приливным перемещением слоя смешения речных и морских вод на границе соленостного клина.

- В эстуарии реки Кеми выявлена двухслойная структура вод и типичная для большинства эстуариев классическая плотностная циркуляция, при которой результирующие течения в верхнем слое направлены в сторону моря, а в нижнем слое – в сторону реки. В эстуарии реки Кеми выделен маргинальный фильтр по максимуму в поле мутности.

- Представлена усовершенствованная гидродинамическая модель интрузии морских вод в устья рек с методикой аналитического определения толщины клина морских вод в устьевом створе.

- Показано, что соленостный клин является не строго выпуклым, а имеет участки с разными знаками кривизны, носик клина в устье р. Кемь является подвижным и перемещается с приливом и отливом.

- При вхождении приливной волны в эстуарий на нее действуют два разнонаправленных фактора – эффект схождения берегов (эффект конфузора), который усиливает амплитуду прилива, и эффект турбулентного трения, который приводит к диссипации энергии и уменьшению амплитуды волны.

- Показано, что гидродинамическая основа модификации Руссела формулы Лагранжа – Эри при выходе волны на мелководье определяется слоем Стокса, который никак не связан с амплитудой волны.

- Трение в волновых процессах приводит к возникновению слоя Стокса, по отношению толщины которого к глубине эстуария их можно разделить на мелководные, глубоководные и «странные».

- В глубоководных эстуариях эффект конфузора превалирует, и амплитуда прилива увеличивается в вершине залива, в мелководных – наоборот, превалирует турбулентное трение, и амплитуда приливной волны уменьшается к вершине эстуария.

- При глубинах порядка толщины слоя Стокса возникает случай «странной бухты» - в начале при входе в эстуарий больше проявляется



эффект трения, и амплитуда приливной волны уменьшается, но затем по мере продвижения волны вглубь эстуария начинает превалировать эффект конфузора, и амплитуда приливной волны начинает вновь увеличиваться. В эстуариях переменной глубины амплитуда прилива сильнее увеличивается при выгнутом вверх рельефе дна. В двухконфузорных эстуариях со скачком глубин в выпуклой наружу бухте высота приливной волны больше, чем в вогнутой внутрь.

- Лабораторные эксперименты показали, что вращение Земли является причиной асимметрии левых и правых бухт. Из-за возникновения циклонической закрутки объема воды в силу сохранения потенциального вихря трение становится больше в левых бухтах, нежели в правых.

#### **Список основных публикаций автора по теме диссертации:**

##### В рецензируемых журналах:

1. Зырянов В.Н., **Чебанова М.К.**, Филатов Н.Н. Интрузия морских вод в устья рек // Водные ресурсы. – 2015. – Т.42. – № 5. –С.1-12.
2. Зырянов В.Н., **Чебанова М.К.** Гидродинамические эффекты при вхождении приливных волн в эстуарии // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 4. – С. 1 – 8.

##### В сборниках и других изданиях:

1. **Чебанова М.К.** Некоторые особенности интрузии морских вод в устье реки Кеми // Процессы в геосредах. Сб. научных статей. – М: ИПМех РАН. – 2014. – № 1. – С. 162-169.
2. **Чебанова М.К.** Некоторые особенности интрузии морских вод в устье реки Кемь // Процессы в геосредах. – М.: ИПМех РАН. – №1(1). – 2015. – С.105-113.
3. Зырянов В.Н., **Чебанова М.К.** Приливные волны в эстуарии // Процессы в геосредах. – М: ИПМех РАН. – 2015. – №3(3). – С. 21-34.
4. **Чебанова М.К.** Гидрофизические процессы в эстуариях // Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии. Лекции научных сотрудников, преподавателей и молодых ученых для вузов (по

докладам Международной молодежной школы-конференции). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2015. – С. 91-101.

Опубликованные тезисы докладов:

1. **Чебанова М.К.** Интрузия морских вод в эстуарии реки Кеми // Сб. докладов на VII международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (11-13 декабря 2013 г., Москва, Россия). – М.: ИВП РАН. – 2013. – С. 61 – 67.

2. **Chebanova M.K.** «Salt water intrusion in the tidal estuary of the river Kem». International White Sea Student Workshop on Optics of Coastal Waters. Book of abstracts. — Abstracts of lectures and poster presentations of the International White Sea Student Workshop on Optics of Coastal Waters; Nikolai Pertsov White Sea Biological Station of Lomonosov Moscow State University; Republic of Karelia, Russia, 30 August – 7 September, 2014. — WSBS – Moscow, 2014. – P. 11.

3. Зырянов В.Н., **Чебанова М.К.**, Филатов Н.Н. Взаимодействие морских и речных вод в устьях приливных рек (на примере устья р. Кеми) // Сб. научных трудов конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии РФ на период до 2020 г.». – Петрозаводск: КарНЦ РАН. – 2015. – Т.1. – С. 287-294.

4. Зырянов В.Н., **Чебанова М.К.** Приливные волны в эстуарии // Сборник тезисов по итогам 4-ой международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2015», 19-24 октября 2015г., г. Москва, МГУ им. Ломоносова. – 2015. – С. 427 – 430. URL: <http://www.maresedu.com/#!/materials/cee5>

5. Зырянов В.Н. **Чебанова М.К.** Эффекты конфузора и турбулентного трения в динамике приливных волн в эстуарии // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Международная научная школа молодых ученых; 11-13 ноября 2015 г., Москва: Сборник тезисов. – М.: МАКС Пресс. – 2015. – С. 92 – 95.

**Чебанова Марианна Кирилловна**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**ПРОЦЕССЫ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД И  
ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН В ЭСТУАРИЯХ**

Подписано в печать 19.04.16. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Усл.печ.л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт водных проблем Российской академии наук (ФГБУН ИВП РАН)

119333, Москва, ул. Губкина, дом 3 Отпечатано в ИВП РАН