



На правах рукописи

СМАГИН РОМАН ЕВГЕНЬЕВИЧ

Взаимодействие морских и речных вод в приливном эстуарии
(на примере устьевой области р. Кереть Белого моря)

25.00.28 — Океанология

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена на кафедре океанологии Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель:

кандидат географических наук,
доцент Виктор Владимирович Ионов

Официальные оппоненты:

доктор географических наук
Алексей Вадимович Зимин,
Институт океанологии им. Ширшова РАН,
руководитель лаборатории

кандидат географических наук
Роман Эдуардович Здоровеннов,
Институт водных проблем Севера РАН,
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Государственный научный центр
«Арктический и антарктический научно-
исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ»)

Защита состоится 21 мая 2018 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.140.01 Мурманского морского биологического института КИЦ РАН по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ММБИ и на сайте организации: http://www.mmbi.info/fs/files/1061/Dissertaciya_smagin.pdf

Автореферат разослан 11 апреля 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.140.01
кандидат географических наук

И.С.Усягина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Устьевые области рек – изменчивые, сложные самоорганизующиеся морские экосистемы на стыке реки и моря. Структуру и свойства водных масс, формирующихся при смешении речных и морских вод, определяют природные процессы не только в устьевой области, но и за её пределами. Под устьевой областью принято понимать весь район динамического взаимодействия и смешения речных и морских вод, включая дельты и эстуарии. Предлагается выделять эстуарий, как промежуточный водный объект. В приливных эстуариях на характер перемешивания и стратификации вод существенно влияют приливы, которые различаются по величине колебаний уровня и характеру течений. Поэтому, при изучении конкретного приливного эстуария, основной задачей становится выявление механизма циркуляции и смешения морских и речных вод, как ведущего процесса в формировании гидрологического режима эстуария, с последующим его районированием и типизацией. В данной работе подробно рассматривается малый приливной эстуарий (губа Кереть), как часть устьевой области реки Кереть, впадающей в Кандалакшский залив Белого моря.

Изученность эстуарных проблем. Хорошо исследованы эстуарные районы устьев крупных рек. Эстуарии небольших рек изучены не столь подробно, преимущественно когда такие районы становятся объектом внимания в связи с предполагаемыми гидротехническими, рыбоводными и другими хозяйственными мероприятиями.

Цель работы: выявление характера и особенностей смешения морских и речных вод в малом приливном эстуарии реки с незарегулированным стоком (на примере р. Кереть).

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи: 1) совершенствование известных методик исследований взаимодействия и смешения морских и речных вод; 2) постановка морского натурального эксперимента в типичном (малом) приливном эстуарии; 3) определение приливного режима устьевой области р. Кереть для летнего сезона; 4) анализ пространственно-временной изменчивости местоположения разнородных вод, галоклина и гидрофронта в эстуарии р. Кереть при различных гидродинамических условиях.

Исходные материалы. Данные полевых наблюдений, выполненных в 2006–2014 гг. Кроме того, в работе использовались материалы из архивных и литературных источников, собранных автором в разное время в научных организациях и библиотеках Санкт-Петербурга.

Личный вклад автора. Все полевые работы проводились под руководством или при непосредственном участии автора диссертации, как и последующие обработка, анализ первичных данных и результатов численного гидродинамического моделирования динамических процессов в губе Кереть.

Методы исследований. Полевые исследования на водном объекте выполнялись в соответствии с принятыми методиками гидрометеорологических работ в приливных устьях рек. Была осуществлена серия натуральных экспериментов в губе Кереть при различных гидродинамических и сезонных условиях, произведена обработка полученных данных, усовершенствована методика изучения взаимодействия вод различного происхождения с использованием контактных и неконтактных измерителей.

На защиту выносятся:

1. Новый подход к исследованию малого приливного эстуария, основанный на схеме комплексного итерационного алгоритма: натуральный эксперимент, обработка результатов контактных и бесконтактных измерений, создание и реализация гидродинамической модели с граничными условиями, получаемыми из очередного натурального эксперимента.
2. Определённый для летнего периода приливной режим устьевой области р. Кереть.
3. Выявленные особенности гидрологического режима устья р. Кереть.
4. Свидетельства необычных гидродинамических явлений в губе Кереть (разнонаправленные приливные течения в проливе Подпахта, остаточная приливная циркуляция в губе Лебяжья).

Достоверность и обоснованность результатов работы основываются на большом количестве использованных в ней материалов (как полевых, так и литературных), а также на применении современных методов сбора, обработки и анализа исходной информации, результатов численного гидродинамического моделирования динамических процессов в устьевой области.

Научная новизна работы. Впервые подробно изучен приливной режим акватории устьевой области реки Кереть, что является важным подспорьем для гидробиологических исследований береговой зоны Белого моря. Впервые для ограниченного отрезка времени реализован универсальный подход к исследованию малого приливного эстуария, как части устьевой области, который объединяет частные методики постановки и проведения морского натурного эксперимента, обработки его результатов и результатов численного моделирования динамических процессов в пределах акватории.

Практическая значимость работы. Сведения о взаимодействии морских и речных вод, границе их раздела позволяют выявить особенности гидрологического режима, который определяет кормовую базу для популяций ценных промысловых рыб в устье р. Кереть. Предложенный применительно к условиям приливного эстуария реки с незарегулированным стоком подход может использоваться при решении прикладных задач в любой устьевой области, где наблюдаются приливы.

Апробация результатов работы. Результаты исследований использовались при выполнении работ по темам РФФИ, мероприятиям по расширению учебных и научных программ межвузовского сотрудничества.

Исследования проводились в рамках инициативных проектов РФФИ №07-05-00583-а «Развитие методов мониторинга устьевых областей рек на основе георадиолокации и интегральной оценки состояния водных объектов», №11-05-01211-а «Исследование распространения и трансформации речных вод в приливном эстуарии с использованием неконтактных методов натуральных измерений и численного гидродинамического моделирования», а также проекта СПбГУ (Мероприятие б) №18.42.157.2013 «Океанологические подспутниковые экспедиционные исследования в Белом и Японском морях».

По теме работы сделаны доклады на научных мероприятиях:

Научно-практические конференции студентов, аспирантов и преподавателей факультета географии и геоэкологии СПбГУ (в рамках Большого Географического Фестиваля), г. Санкт-Петербург, 2006-2007гг.; Международная научная конференция «Изучение и освоение морских и наземных экосистем в условиях арктического и аридного климата», г. Ростов-на-Дону, 6-10.06.2011г.;

Международная научная конференция, посвященная 150-летию Н.М. Книповича «Экологическая безопасность приморских регионов (порты, берегозащита, рекреация, марикультура)», Ростов – на – Дону, 5-8.06. 2012г.; Международная научная конференция «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря», Петрозаводск, 30.09.-4.10.2013г.; Международный семинар «Transboundary watershed territories: Finland and Russia – White Sea watershed», Петрозаводск, 3-4.08.2013г.; Заседание Океанографической комиссии в РГО на тему «Комплексные исследования приливных явлений губы Кереть (Кандалакшский залив, Белое море)», г. Санкт-Петербург, 9.06.2015г.; Международная научно-практическая конференция «Природное и культурное наследие Белого моря: перспективы сохранения и развития», п. Чупа, Республика Карелия, 17-19.07.2015г.; Всероссийская научная конференция «Экологическая стратегия развития прибрежных регионов: география, окружающая среда, население», Ростов-на-Дону, 15-18.12.2015г.

Публикации. Итоги исследований изложены в 4 статьях (все в рецензируемом журнале по перечню ВАК) и 8 тезисах докладов.

Благодарности. Основная часть исследований проводилась по научным программам, реализующихся на кафедре океанологии СПбГУ, а также по грантам РФФИ (№№07-05-00583-а и 11-05-01211-а). Автор получал ценные советы и консультации от сотрудников различных кафедр факультета географии и геоэкологии СПбГУ, а также от сотрудников ГНЦ ААНИИ (г. Санкт-Петербург). При организации и проведении полевых работ большую помощь оказали сотрудники кафедры физики Земли физического факультета СПбГУ, а также сотрудники Морской Биологической Станции СПбГУ (Лоухский р-н Республики Карелия, о. Средний). В процессе сбора и обработки данных весьма полезными были консультации представителей беломорского биологического сообщества (сотрудники Беломорской биологической станции (ББС) ЗИН РАН «Мыс Картеш» и учебно-научной станции «Беломорская» Казанского федерального университета) и коренных местных жителей. Автор выражает свою глубочайшую признательность всем лицам и организациям, способствовавшим выполнению данной работы.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы.

Работа изложена на 107 страницах, содержит 9 таблиц и 72 рисунка. Список литературы включает 89 наименований (из них 21 на иностранных языках).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Особенности взаимодействия солёных и пресных вод в устьевых областях рек. Цель первой главы состоит в обзоре современных представлений об особенностях взаимодействия солёных и пресных вод в устьях, которые представляют предмет диссертационного исследования.

В первой части главы автор попытался обобщить сведения об условиях, формирующих общий гидрологический режим приливного эстуария – влиянии моря и поступлении речных вод. Даны разъяснения, которые позволяют разграничить понятия «устьевая область реки» и «эстуарий», причём последнее является частью первого. При этом, эстуарные районы играют роль своеобразных барьеров, разделяющих влияние реки и моря. Отмечено, что в настоящее время недостаточно изучены эстуарии малых рек. Белое море, вследствие полузамкнутости, распреснено благодаря стоку многочисленных рек. И наоборот, рассматриваемый в работе Кандалакшский залив, с рассредоточенным стоком малых рек, подвержен наименьшему распреснению. Обращается внимание на специфическую особенность устьев беломорских рек – выраженные приливные явления. Внутри приливных эстуариев особенности взаимодействия речных и морских вод наиболее чётко проявляются в характерных зонах смешения. Здесь солёность воды возрастает от солёности, свойственной речной воде (не более 1‰) до солёности морских вод, и эта величина условно принимается в качестве верхней границы зоны смешения. Расположение верхней границы зоны смешения одновременно определяет границу осолонения вод. При активном взаимодействии разнородных вод формируются горизонтальные и вертикальные градиенты гидролого-гидрохимических характеристик, которые могут быть выражены в виде галоклина, гидрофронтов и фронтальных зон различного масштаба. Тем самым, автор обосновывает выбор границ для исследования приливного эстуария р. Кереть, в котором указанные процессы проявляются наиболее выражено.

Во второй части главы излагаются общие вопросы классификации и районирования эстуариев. Рассмотрены

классические подходы к типизации таких объектов отечественных специалистов и зарубежных исследователей. Особое внимание в обзоре уделяется наличию приливного фактора. Специфика приливного эстуария заключается не столько в морфометрических признаках, сколько в происходящих в нём процессах взаимодействия разнородных вод под влиянием приливов. В связи с этим, рассмотрены количественные параметры, характеризующие различные процессы в приливных эстуариях (например, параметр стратификации, пропорциональный разнице солёности воды в придонных и поверхностных горизонтах, индекс смешения, величина приливного колебания уровня, дальность распространения приливных явлений и др.). На основе приведённых аргументов предлагается считать устье р. Кереть типичным приливым эстуарием.

В третьей части главы предпринята попытка охарактеризовать традиционные и современные методы исследования гидрологии приливых эстуариев. Отмечается, что вне зависимости от выбранного метода, исследование объекта целиком невозможно без исследования зоны смешения. В отличие от натуральных и лабораторных вариантов исследования, численные математические модели часто не учитывают то, что в природных условиях речная и морская вода разделена слоем галоклином. На динамику эстуарных вод также заметно влияет проникновение приливной волны в сторону реки, а возникающие при этом нелинейные эффекты создают явление приливной накачки. В помощь интерпретации результатов разрозненных инструментальных измерений, автор предлагает возможности численного гидродинамического моделирования (с заданием модельных (граничных) условий, отражающих специфику района), а также современные геофизические методы, в частности, бесконтактный метод подповерхностной радиолокации (георадиолокации).

Глава 2. Исследование взаимодействия речных и морских вод в приливном эстуарии р. Кереть. (Глава основана на материалах собственных полевых наблюдений, проводившихся в летние сезоны 2006–2014 гг.). Приливной эстуарий р. Кереть находится в пределах Карельского берега Белого моря. Река берёт начало из озёр Северной Карелии и впадает в Кандалакшский залив Белого моря. Сток Керети практически незарегулирован – на площади водосбора нет крупных гидротехнических сооружений и

водохранилищ. Водосбор реки располагается на территории, в основе которой лежат граниты и гнейсы Балтийского щита. Вследствие этого, на различных участках русла и в месте впадения реки в море расположены обширные цепи порогов. Для Керети характерен небольшой сток наносов, а среднегодовой расход реки составляет $22,6 \text{ м}^3/\text{с}$ (Бобров и др, 2008).

Река, впадая в море, образует однорукавную воронкообразную устьевую область (эстуарий). Керети присущ гипопикнальный тип втекания речного потока в приёмный водоём. Устьевое взморье отгорожено островами (о. Средний и о. Бол. Горелый), а водообмен эстуария с морем осуществляется через проливы Средняя Салма, Узкая Салма и Подпахта (рис. 1).



Рис.1. Район приливного эстуария реки Кереть (часть Карельского берега Белого моря): устьевое расширение; пролив Средняя Салма (губа Кереть); пролив Узкая Салма; пролив Подпахта, Большой Керетский рейд.

Глубины в эстуарии (губа Кереть) увеличиваются в сторону моря, причём рельеф дна сочетает в себе впадины с глубинами до 20-30м и относительно ровные мелководные участки. Повсеместно встречаются полосы песчано-илистых и каменистых осушек и отмелей вдоль берегов. В вершине залива глубины не превышают 3-4м.

На гидрологический режим губы Кереть значительное влияние оказывают приливы, хорошо проявляющиеся в колебаниях уровня и реверсивном характере течений. Проникновение

приливной волны в устье реки сопровождается её трансформацией и затуханием, а также результирующим переносом массы воды и дополнительным повышением среднего уровня воды. Известно, что в таких случаях поступательный характер приливной волны, вследствие многократного отражения, значительно искажается (Ионов и др, 2009). Здесь наблюдается правильный полусуточный прилив с доминированием главной лунной полусуточной волны M_2 с периодом 12ч 25 мин. Это подтверждается и критерием Дуванина KD (Дуванин, 1960), который для губы Кереть находится в диапазоне 0,11 – 0,14, что соответствует правильному полусуточному приливу (Ионов и др., 2013).

Термический режим эстуарных вод определяется радиационным балансом водной поверхности, тепловым стоком реки, теплообменом с морскими водами, а также наличием в холодный период года ледяного покрова. Температура воды подвержена сезонной изменчивости; летом водная толща здесь обычно стратифицирована. В разгар лета происходит интенсивный прогрев поверхностного слоя (иногда до 19-21°C) и хорошо прослеживается термическое расслоение с выраженным слоем скачка температуры воды. Обычно он совпадает с расположением слоя скачка солёности. В то же время в глубоких впадинах губы и в летнее время сохраняется «зимняя» вода с температурой около 0°C, которая отделена от вышележащих вод вторым (глубинным) слоем скачка температуры. Эта вода может сохраняться вплоть до наступления осенней конвекции. На мелководных эстуарных участках, вследствие перемешивания водная толща термически однородна.

Речной сток имеет важное значение в формировании поля солёности в устье р.Кереть. Подобно другим рекам Карельского берега, весеннее половодье начинается в конце апреля – начале мая, а летне-осенняя межень наступает примерно в середине июля и заканчивается конце сентября. В октябре наблюдается короткий паводочный период, а с ноября начинается зимняя межень, которая длится около 130-150 дней. В целом, в поверхностном слое вод эстуария и устьевого взморья наблюдается слой распреснённой воды различной толщины, которая заметно меняется в зависимости от сезона и режима стока.

С учётом этой специфики, и из-за ограниченного отрезка времени наблюдений, при постановке эксперимента в малом

приливном эстуарии и обработке его результатов предлагается использовать многоступенчатый итерационный подход, который состоит из следующих операций:

- Шаг 1. *«Подготовка»* – сбор разрозненных инструментальных данных, специализированные измерения для создания гидродинамической модели малого приливногo эстуария (МПЭ) (линия берега и приливной осушки, батиметрия);
- Шаг 2. *«Постановка»* – выполнение натурного эксперимента (комплекс контактных и бесконтактных измерений), предвычисление (на предстоящий полевой сезон) прилива, исходя из которого планируются многочасовые измерения характеристик течений на различных глубинах;
- Шаг 3. *«Расчёт»* – анализ коротких рядов наблюдений и получение гармонических постоянных приливных течений с помощью Адмиралтейских методов, создание сеточной области модели, определение граничных условий по гармоническим постоянным колебания уровня моря и приливных течений;
- Шаг 4. *«Итерационная подгонка»* – реализация модели, её корректировка и повторная верификация для подтверждения особенностей гидродинамики района. Этап состоит из итерационных повторов Шагов 3 и 2:
 - – верификация реализуемой модели (на Шаге 3);
 - – проведение измерений для верификации (на Шаге 2);
- Шаг 5. *«Завершение»* – восстановление четырёхмерных гидрофизических полей по данным совместного анализа результатов моделирования и результатов контактных и бесконтактных измерений.

В период с 2006 по 2014 гг. в устьевой области р. Кереть была проведена серия натурных экспериментов, направленных на изучение взаимодействия морских и речных вод, а именно:

- 1) постановка многочасовых океанологических станций в различных точках приливногo эстуария;
- 2) океанологические разрезы и съёмки;
- 3) выполнение маршрутного георадиолокационного профилирования и георадиолокационного зондирования в заданных точках акватории;
- 4) измерение расхода реки и уровня моря;
- 5) отбор проб воды для гидрохимического анализа;

- 6) батиметрические (промерные) работы;
- 7) метеорологические наблюдения.

Основным сезоном полевых работ было лето. Этому времени соответствует межень, в течение которой изменения стока и уровня сравнительно невелики, за исключением крупных паводков. Это позволяет изучить характерный гидрологический режим в мало меняющихся (стационарных) условиях (Смагин, 2011).

Все виды выполненных полевых работ были условно разделены на:

Океанологическую часть – изучение морского влияния на устьевые (эстуарные) процессы, заключающееся в сборе информации о температуре, электропроводности, солёности вод (вертикальные профили и временной ход), скоростях и направлениях течений (временной ход) на различных горизонтах. Как правило, это были многочасовые океанологические станции, в ходе которых измерения на станциях проводились с дискретностью 30 минут и 1 час. Также выполнялись океанологические разрезы и съёмки. Океанологические работы были организованы с обязательным учётом периодичности приливных явлений, характерных для устья р. Кереть. Во время проведения натурных экспериментов выполнялись краткосрочные наблюдения за уровнем воды (в течение 1-2 суток) и проводились измерения глубин.

Гидрологическую часть – оценка влияния реки на устьевые процессы при разных условиях. Измерялись величины расхода реки в различные фазы режима стока реки (межень, половодье, паводок), производился гидрохимический анализ проб воды, взятой с разных горизонтов. Измерение расхода выполнялось на речном участке согласно стандартным методикам, во многом зависящих от выбора места наблюдений. Большая часть гидрологических работ проводилась совместно с океанологическими работами во время летней межени.

3. **Геофизическую часть** – изучение распространения радиолокационного сигнала, направляемого в толщу воды, которая представляет собой неоднородную среду с разными электрометрическими свойствами. В ходе исследований был задействован и заметно усовершенствован метод подповерхностной радиолокации (георадиолокации). Граница раздела пресных и солёных вод, имеющих разную концентрацию растворённых солей

и различную плотность, хорошо просматривается на радарограммах. Георадиолокационные разрезы (профили) выполнялись по заданным маршрутам, но преимущественно в зоне смещения морских и речных вод, на фазе прилива и отлива. Итогом геофизических работ явился набор пространственных и временных радарограмм, регистрирующих особенности распространения излучаемого сигнала. Первые полевые работы по выявлению характера расположения галоклина в эстуарии реки Кереть при помощи метода георадиолокации были проведены летом 2006 года, и уже первые результаты выявили сложную пространственно-временную структуру галоклина (Бобров и др., 2008).

После обобщения всех видов наблюдений, от сезона к сезону менялась программа исследовательских работ, расширялся район работ, совершенствовались подходы к постановке задач полевых экспериментов. Наиболее важными явились полевые работы в сезонах 2011 и 2012 гг.

Так, в сезоне 2011 г. помимо океанологических измерений, велись георадиолокационные работы при помощи двух радаров (георадары «ОКО» с антенными блоками АБ-250 и АБ-400) на станциях, расположенных вдоль основной струи речного потока, выходящего на эстуарную акваторию. В течение полного месяца (июнь) на уровне поста (о. Средний) были проведены ежечасные наблюдения за ходом уровня моря. По результатам материалов 2011 года на летний период следующего, 2012 года, были предвычислены значения уровня моря на каждый час.

В 2012 году были проведены двухсерийные океанологические измерения в эстуарных проливах:

- 1) Подпахта (11-12.06, 18-19.06.2012),
- 2) Средняя Салма (13-14.06., 20-21.06.2012),
- 3) Узкая Салма (15-16.06., 22-23.06.2012),

когда проводились ежечасные измерения температуры, электропроводности и солёности вод, а также характеристик течений. Начало этих станций в каждой серии отстояло по времени ровно на 7,5 суток друг от друга. В июле 2012г. были выполнены подробные океанологические съёмки по закреплённым точкам (всего – 6) в пределах эстуарной акватории, на которых регулярно выполнялись океанологические станции. Наблюдения осуществлялись в строгом соответствии с изменчивостью приливных явлений – 4 цикла измерений в полную воду (ПВ) и

малую воду (МВ) для условий сизигии (22.07.2012), квадратуры (28.07.2012), промежутка смены с сизигии на квадратуру (25.07.2012) и промежутка смены с квадратуры на сизигию (16.07.2012). Также были выполнены океанологические разрезы вдоль оси эстуария, которые состояли из 6 станций. Этот вид работ выполнялся во время прилива и отлива (25.07. и 30.07.2012). В августе океанологические работы производились совместно с георадиолокационными измерениями (10.08., 12.08., 14.08., 15.08.2012) и лишь однажды без привлечения георадарной техники (05.08.2012). Океанологические работы выполнялись в двух закреплённых точках, расположенных вдоль или поперёк зоны смешения

Глава 3. Особенности гидрологии приливного эстуария реки Кереть в летний период. (На основе анализа результатов полевых работ, проводившихся в летние сезоны 2006–2014 гг.). В устье р. Кереть можно упрощённо выделить морскую зону, зону смешения и речную зону (Ионов и др., 2009). Но с учётом гидрологических и морфометрических особенностей, исследуемую акваторию также можно разделить на:

- 1) Речной участок;
- 2) Зону смешения (устьевое расширение, у деревни Кереть);
- 3) Закрытую часть устьевого взморья (собственно пролив Средняя Салма, губа Кереть);
- 4) Проливы (Узкая Салма, Подпахта, сужение Средней Салмы);
- 5) Устьевое взморье (Большой Керетский рейд).

Речной участок располагается в нижнем течении р. Кереть и представляет собой русло переменной ширины. Рельеф дна в основном пологий, а глубины незначительны (не более 2 – 2,5 м). На речной участок морская вода практически не проникает, однако здесь часто наблюдается подпор, который может быть вызван воздействием со стороны моря. Из-за прилива здесь начинают наблюдаться колебания уровня полусуточного периода.

Для измерения скоростей течения и расхода реки Кереть в августе 2011 г. был выбран репрезентативный участок примерно в 2 км выше по течению от замыкающего створа реки, имеющий прямолинейное русло с относительно спокойным течением. Расход воды, вычисленный аналитическим способом, составил 14,94 м³/с, что оказалось несколько ниже среднемесячного расхода воды для

августа по многолетним данным. В целом, характерная величина расходов для данного периода находится в диапазоне 15-20 м³/с.

В зоне смешения летом наблюдается типичная устойчивая двухслойная структура, которая характерна и для морского участка. При малой воде (МВ) пресная вода располагается в поверхностном слое воды (до 0,6 - 0,7м). Ниже, толщиной не более 0,4 - 0,6м, залегает слой скачка солёности, или галоклин. В полную воду (ПВ) слой пресной воды сокращается до 0,2 – 0,3м, а галоклин увеличивает толщину до 1,0 – 1,2м.

Периодическая изменчивость термохалинной структуры в зоне смешения наглядно отражается на радарограммах. В фазу прилива и отлива на них отображается сложная динамика перемешивания с характерными признаками. Они напоминают по форме зубья пилы, которые в слое галоклина перемещаются вдоль потока от устья к морю с некоторой скоростью (рис.2):

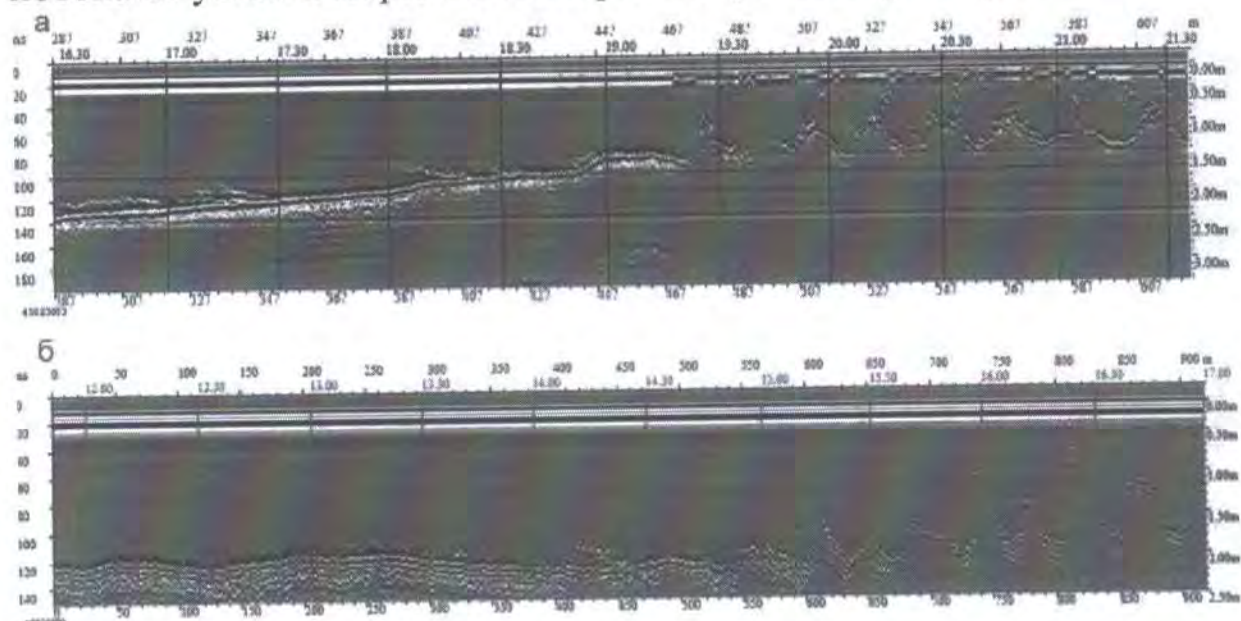


Рис.2. Фрагменты радарограмм, полученных на фазе повышения уровня, а - 16.08.2011г., б - 15.08.2012 г. Начало радарограмм соответствует двухчасовому сдвигу от минимума уровня воды.

В зоне смешения периодически происходит изменение положения гидрофронта (в горизонтальном направлении) и вертикальные флуктуации галоклина, которые могут быть результатом приливного воздействия.

Закрытая часть устьевого взморья (собственно пролив *Средняя Салма*, или *губа Кереть*) занимает большую часть приливного эстуария р. Кереть, а его гидрология заметно отличается от гидрологии зоны смешения. Острова Средний и

Горелый прикрывают эстуарий от прямого морского влияния, а водообмен осуществляется через проливы Узкая Салма, Подпахта и сужение Средней Салмы.

В наиболее глубокой части Средней Салмы (глубины до 30 м) даже в летнее время сохраняется «зимняя» вода, т.е. слой с низкой температурой, который не подвержен перемешиванию вплоть до начала осенней конвекции.

Обычно, к середине июля, поверхностный слой воды (0-2м) в Средней Салме распреснен и становится достаточно прогретым (16-18°C). Налицо устойчивая термическая стратификация, а ближе к устью реки толща воды становится ещё теплее, по сравнению с морским краем эстуария. Пространственное расположение галоклина типично для эстуарной зоны: ближе к зоне смешения он ярко выражен, а в сторону моря, наоборот, заглубляется и становится более размытым. Благодаря приливной динамике вод, распреснение достигает глубин 2-2,5м. В фазу отлива влияние прилива сказывается в меньшей степени. Вплоть до наступления осени, устойчивая стратификация сохраняется, препятствуя перемешиванию вод разных слоёв.

Гидрология пролива *Узкая Салма* во многих чертах повторяет гидрологию Средней Салмы. Летом для вод пролива также характерна устойчивая стратификация. Однако, морфометрия берегов и топография дна придают проливу специфические гидрологические отличия. В летний период, благодаря речному стоку, в Узкой Салме тоже формируется поверхностный распреснённый слой. Он хорошо прогревается (до 15-17°C), но толщина этого тёплого слоя не превышает 0,3-0,5м и постоянно меняется, несколько увеличиваясь при максимальном отливе. Глубже залегает слой скачка температуры и солёности (до глубины 2м), в котором температура резко понижается до 10-11°C, варьируя в разные фазы приливного цикла, а солёность возрастает до 26‰. Под этим слоем располагается однородный по солёности слой воды с температурой около 10°C. На вертикальных профилях хорошо заметна изотермия, причём на приливе она часто разбивается на несколько участков меньших размеров. С началом отлива профиль претерпевает изменения, в частности, вертикальная изотермия приобретает привычный вид.

Очевидно, что на *устьевом взморье*, которое включает в себя Большой Керетский рейд (БКР) и пролив Большая Салма, речные

воды могут быть представлены лишь в виде слабо распреснённой или солоноватой воды. Гидрология устьевого взморья практически полностью зависит от влияния вод открытого моря. Так, за о. Боршовец, на условной мористой границе устьевого взморья, в поверхностном слое солоноватая вода уже практически не различима. До глубин 8-10м можно выделить слой скачка солёности (рост значений с 26 до 27,5‰) и температуры воды (понижение с 14 до 12°C). С увеличением глубины температура воды монотонно понижается (до 0°C), а солёность не испытывает заметных колебаний и достигает значения 28‰. В целом, термохалинная структура вод устьевого взморья является переходной от эстуарных вод к водам открытого моря. Летом поверхностный слой воды достаточно хорошо прогрет и перемешан, в то время как с глубиной температура понижается, а солёность растёт. По мере удаления от устья верхний прогретый слой сокращается, а сезонный слой скачка температуры становится резче выраженным, располагаясь на глубинах 10-12м.

Глава 4. Приливной режим устьевого области реки Кереть. (На основе результатов модельных расчётов и сравнения их с натурными данными). В первой части главы приводятся основные результаты гармонического анализа приливных колебаний уровня и течений.

Приливные колебания уровня. Большая часть собранных данных использовалась для верификации опробованной численной гидродинамической модели приливного эстуария р. Кереть. Наблюдения за уровнем вод велись ежечасно с помощью гидрометрической рейки на уровненом посту (о. Средний).

Для обработки массива данных, собранных во время летних сезонов 2011, 2012 и 2013гг., использовался гармонический анализ, который предоставил новые и интересные результаты. В ходе обработки записей измерений были созданы временные ряды из 648 значений в 2011г. и 720 значений в 2012 и 2013гг. Реализация гармонического анализа осуществлялась при помощи метода наименьших квадратов. Он впервые позволил оценить амплитуды и фазы 33 гармоник, выбранных по упрощённому критерию Рэлея.

В частности, для указанного участка побережья были выделены две долгопериодные гармоники: лунная месячная M_m и лунно-солнечная синодическая полумесячная MS_f . Общая дисперсия выделенных долгопериодных гармоник оказалась

немногим меньше одного процента от общей дисперсии приливных колебаний. Вычисленная амплитуда лунно-солнечной синодической волны MS_f составила 5,6-5,8 см. Гармонические постоянные волны MS_f хорошо согласовались с результатами оценок амплитуды и фазы долгопериодной нелинейной волны, формирующейся в виде нелинейного взаимодействия волн M_2 и S_2 ($q_{MS_f} = q_{S_2} - q_{M_2}$), найденного для Белого моря с помощью численного моделирования (Май, 2006). В группу суточных гармоник, выделенных в результате гармонического анализа, вошли 7 гармоник. Лунно-солнечная деклинационная гармоника K_1 имеет амплитуду 9 см, что составляет 1,5% от общей дисперсии приливного колебания уровня моря. Примечательно, что амплитуда лунной малой эллиптической волны J_1 (1,2 см) незначительна, но всё же превосходит амплитуду главной лунной деклинационной волны O_1 (1,0 см). Обычно же считается, что из суточных составляющих прилива должны доминировать волны K_1 и O_1 .

Наибольший вклад в дисперсию колебания уровня моря вносят полусуточные гармоники: они обеспечивают 95,4% дисперсии приливного колебания уровня. Амплитуда главной лунной полусуточной гармоники M_2 составила почти 69 см или 90,4% дисперсии предвычисленного ряда. Главная солнечная гармоника S_2 дала амплитуду почти в 11 см, что более чем в шесть раз меньше амплитуды волны M_2 . Примечательно, что согласно работам (Таблицы приливов, 1940) и Гидрологический справочник, 1958) лунный прилив в губе Кереть больше солнечного всего лишь в четыре раза. Амплитуда главной солнечной полусуточной гармоники почти сопоставима с главной лунной эллиптической гармоникой N_2 , т.е. солнечный прилив имеет такую же высоту, что и колебания лунного прилива за счёт эллиптичности лунной орбиты. Поскольку в Белом море нелинейные приливные явления ярко выражены, отсутствие оценок амплитуд и фаз мелководных гармоник в ранних источниках лишь подчёркивает незавершенность исследования приливного режима. Результаты анализа показали, что дисперсия мелководных короткопериодных гармоник составляет около 2% от общей дисперсии приливного колебания уровня моря, т.е. это группа гармоник превосходит даже суточные волны, вклад которых был оценен в 1,6%, уступая лишь полусуточным гармоникам. Основная мелководная гармоника M_4 имеет амплитуду 8 см, что сопоставимо с амплитудой суточной

приливной волны K_1 . Т.е., не имея информации о мелководных гармониках, любые предвычисления прилива дадут грубые результаты. Исходя из обработанных данных, соотношение амплитуд обертона главной лунной полусуточной гармоники M_4 и самой волны M_2 даёт значение 0,12, которое можно использовать в качестве критерия вклада нелинейных приливных явлений в динамику моря. По рассчитанным гармоническим постоянным был предвычислен приливной уровень моря на известные даты измерений (4-30.06.2011 г.) (рис. 3):

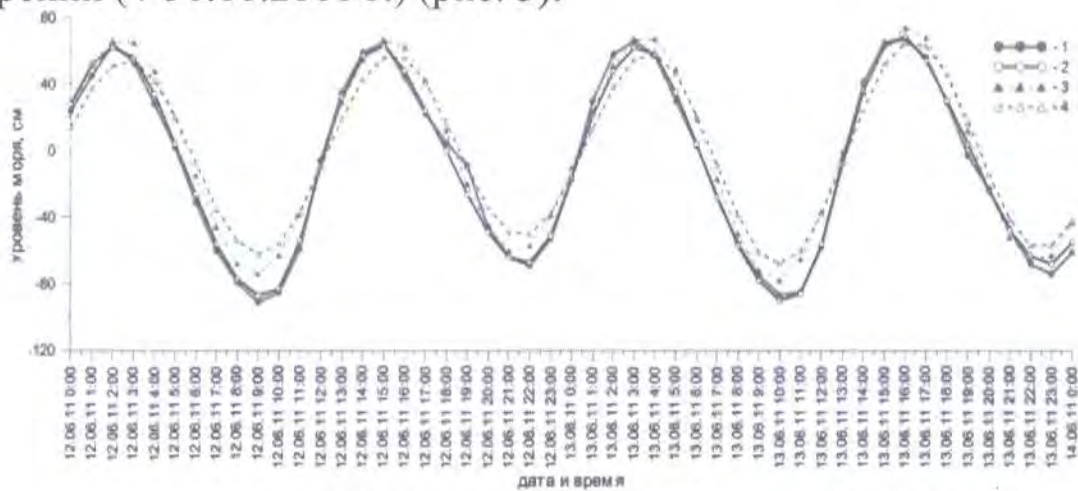


Рис. 3. Сравнение результатов предвычисления прилива в эстуарии р. Кереть по различным данным. 1 – измерения уровня моря в июне 2011 г.; 2 – предвычисления по обновлённым гармоническим постоянным; 3 – предвычисления по гармоническим постоянным, опубликованным в Таблицах приливов (1940); 4 - предвычисления по гармоническим постоянным из Гидрологического справочника (1958).

Предвычисление по материалам из ранних источников имеет несколько худшее качество: среднеквадратическая ошибка там составляет 14-16 см, средняя абсолютная ошибка -- 11-13 см, а коэффициент парной корреляции 0,95 - 0,96. Предвычисление по вновь определённым гармоническим постоянным превосходит ранние результаты. Высокие значения коэффициентов парной корреляции свойственны всем синфазным гармоническим колебаниям с одинаковыми периодами.

Для этого же места были вычислены некоторые негармонические постоянные прилива: средний прикладной час (HWI) – 12,2ч; прикладной час порта (HWF &Ch) – 12,5 ч; возраст наблюдаемого полусуточного прилива τ_{SM} – 59,4ч; возраст суточного прилива τ_{KO} – 98,0ч; возраст параллактического прилива τ_{MN} – 68,5ч. *Приливные течения.* Измерения течений в проливах Средняя Салма

и Узкая Салма обычно проводились на трёх горизонтах (1, 3 и 6 м) при помощи измерителя течений «Вектор-2». Первичный анализ данных для обоих проливов показал, что в целом подповерхностное течение (горизонт 1 м) отличается от течений на горизонтах 3 и 6 м, что можно объяснить влиянием ветра. Течение на горизонтах 3 и 6 метров чаще всего направлено из Большого Керетского рейда в губу Кереть. Так как для численного гидродинамического моделирования приливного эстуария р. Кереть потребовалось задание баротропных приливных течений, их вектора в проливах были осреднены по вертикали.

Анализ данных подтвердил предположение, что с наступлением полной воды начинается смена течений с приливного на отливное, а малая вода соответствует примерно началу смены течений с отливного на приливное. В отличие от нелинейных мелководных эффектов в колебаниях уровня, проявляющихся в разности времен роста и падения, аналогичные эффекты в изменчивости приливного течения в губе Кереть выражаются по-другому. Приливное течение (из моря в эстуарий), как правило, более сильное, чем отливное, но оно (из эстуария в море) более продолжительное по сравнению с приливным.

Во второй части главы приводятся некоторые результаты моделирования приливных движений. В целях сопоставления полученных результатов, описывающих особенности приливного режима эстуарного района, были использованы возможности численного гидродинамического моделирования. Совершенно неожиданно оказалось, что для приливного эстуария Керети широко используемые криволинейные сетки оказались неэффективными: участки открытой границы модели (проливы Подпахта, Средняя Салма и Узкая Салма) и само эстуарное расширение потребовали детального описания (более мелкой сетки).

После подбора нескольких вариантов выяснилось, что для этого района наиболее оптимальной оказалась прямоугольная сеточная область с пространственным шагом 33 м, предоставившая детальное описание рельефа дна и береговой линии. Для того чтобы водообмен через проливы, определяющий приливную динамику района не был искажен влиянием грубой аппроксимации прямоугольной сетки, сеточная область была повернута на угол

350°. При такой ориентации сетки проливы практически без искажений нашли свое отражение в матрицах модели.

Созданная сеточная область модели получила три открытых границы в ячейках соответствующих проливам Подпахта, Средняя Салма и Узкая Салма. Для корректного задания граничных условий в модели потребовалось задать приливные колебания уровня моря и течения в узлах сеточной области. В частности, было введено предположение, что колебания уровня, вызванные приливными процессами, не должны значительно меняться на всей акватории эстуария. Предполагаемое условие было заложено в реализуемой для указанного района модификации модели PrincetonOceanModel (POM). Первые сравнения результатов моделирования с данными измерений уровня моря показали, что модель идеально воспроизводит колебания уровня моря. Коэффициент парной корреляции между измерениями и результатами моделирования составил 0,98, а среднеквадратическое отклонение (среднеквадратическая ошибка) – 5,3 см.

По результатам моделирования максимальное приливное течение наступает почти сразу же после момента смены вод (переход через нулевую отметку в модели). Следовательно, приливное течение и приливной уровень моря находятся в противофазе. Такое соответствие моментов наступления полной воды и смены приливного течения на отливное говорит о том, что приливная волна в устьевой зоне реки Кереть имеет признаки стоячего типа.

Наибольший вклад в изменчивость приливных течений вносят течения с периодом главной лунной полусуточной гармоники M_2 (рис.4):

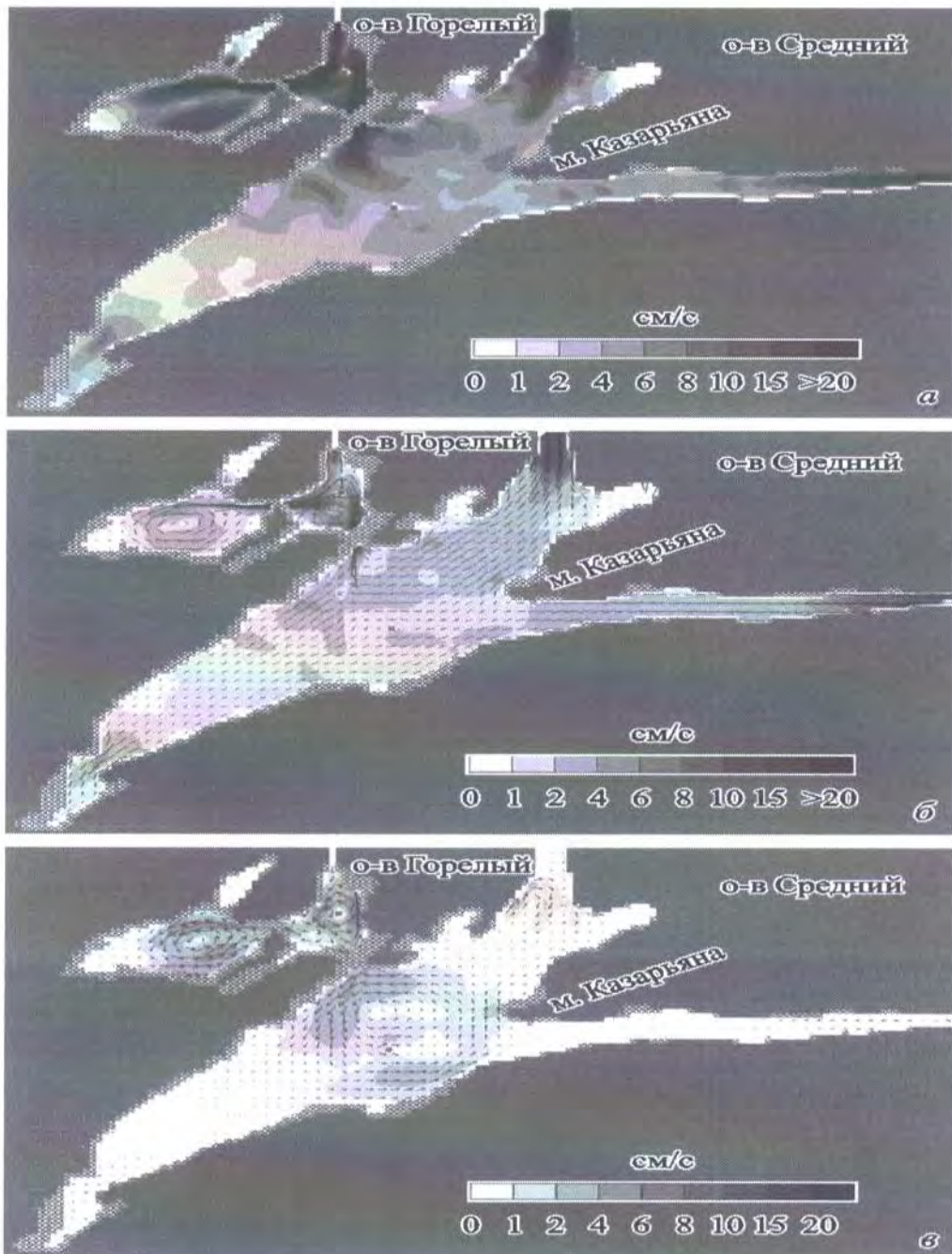


Рис.4. Приливные течения в губе Кереть (по модельным расчётам): *а* – максимальное значение модуля скорости приливных течений; *б* – эллипсы приливных течений волны M_2 ; *в* – осреднённые за месяц скорости приливных течений.

Приливные течения волны M_2 преимущественно реверсивные (большая ось эллипса намного больше малой). Область с коэффициентом сжатия эллипса больше 0,5 располагается в центральной части эстуария, по соседству с проливом Подпахта. Смена приливных течений происходит по часовой стрелке, а пространственное расположение фаз максимальной скорости приливных течений волны M_2 однородно и колеблется в пределах 120-150°.

Для моделирования изменчивости термохалинной структуры вод были заданы условия:

- 1) двухслойная структура; верхнюю часть (до глубин 1-1,5 м) которой занимают речные воды с температурой более 15°C;
- 2) термоклин и галоклин, где температура снижается до 13-13,5°C, а солёность увеличивается до 28-29‰;
- 3) основная толща – солёная вода с температурой менее 13°C.
- 4) термохалинная структура определяется распространением пресной воды.

Для воспроизведения такой структуры были заданы начальные поля температуры и солёности со значениями 13°C и 29‰, соответственно. Уже после 5 суток модельного времени появилось заявленное распределение температуры и солёности. В устьевом расширении отмечается гидрофронт. Особенно хорошо за 1-2 ч до и после малой воды. При полной воде гидрофронт кардинальным образом меняет своё положение, но распреснённые воды располагаются в верхнем 1,5-метровом слое. Ниже этого слоя доминируют холодные, солёные морские воды. С отливом и по достижению малой воды, распреснённый слой охватывает всю толщу воды до дна, но при этом он прижимается к устью.

В третьей части главы выделены особенности приливных явлений в проливе (губе) *Подпахта*. Основная причина – в специфической морфометрии Подпахты – береговая линия сильно изрезана, а рельеф дна неоднороден. Внутри Подпахты имеется несколько небольших заливов, наиболее обширным из которых является *губа Лебяжья*. Вся акватория преимущественно мелководна, а наибольшие значения глубин не превышают 7 м. Поэтому, в губе наблюдается специфическое движение вод, во многом зависящее от поступления морских вод и фазы прилива. В закрытой от моря внутренней мелководной акватории Подпахты в часы прилива наблюдается активное вертикальное перемешивание, причём даже летом температура воды по всей толще составляет 10-11°C.

Этому способствует сильное приливное течение со скоростями, часто превышающими 50 см/с. С наступлением отлива ситуация меняется; температура верхних слоёв растёт (до 18°C), чему способствует смена приливного течения. Скорости отливного течения становятся на порядок меньше и не превышают 20 см/с. Поле солёности аналогично распределению температуры воды.

Пресной воды в Подпахте практически нет, поскольку она сразу перемешивается с солёной водой, поступающей со стороны устьевого взморья. Во время прилива исчезает даже слабосолёная вода, уступая место морской воде со значениями солёности свыше 25‰.

Данные инструментальных измерений в проливе Подпахта хорошо совпадают с результатами моделирования (Ионов и др., 2015). Например, фаза волны M_2 в проливе отличается на один градус, а в губе Лебяжья – ещё на один от фазы в губе Кереть. Т.е. полная вода в Подпахте и губе Лебяжья должна наступить на 2 и 4 мин позже наступления полной воды в губе Кереть. Если течения в проливах Средняя Салма и Узкая Салма практически синхронны, то в различных частях Подпахты отмечаются противонаправленные течения. Так, в момент максимального приливного течения в северной (мористой) части пролива Подпахта течения направлены с севера на юг, а в южной (речной) части – с юга на север, а в отлив – наоборот (рис. 5):

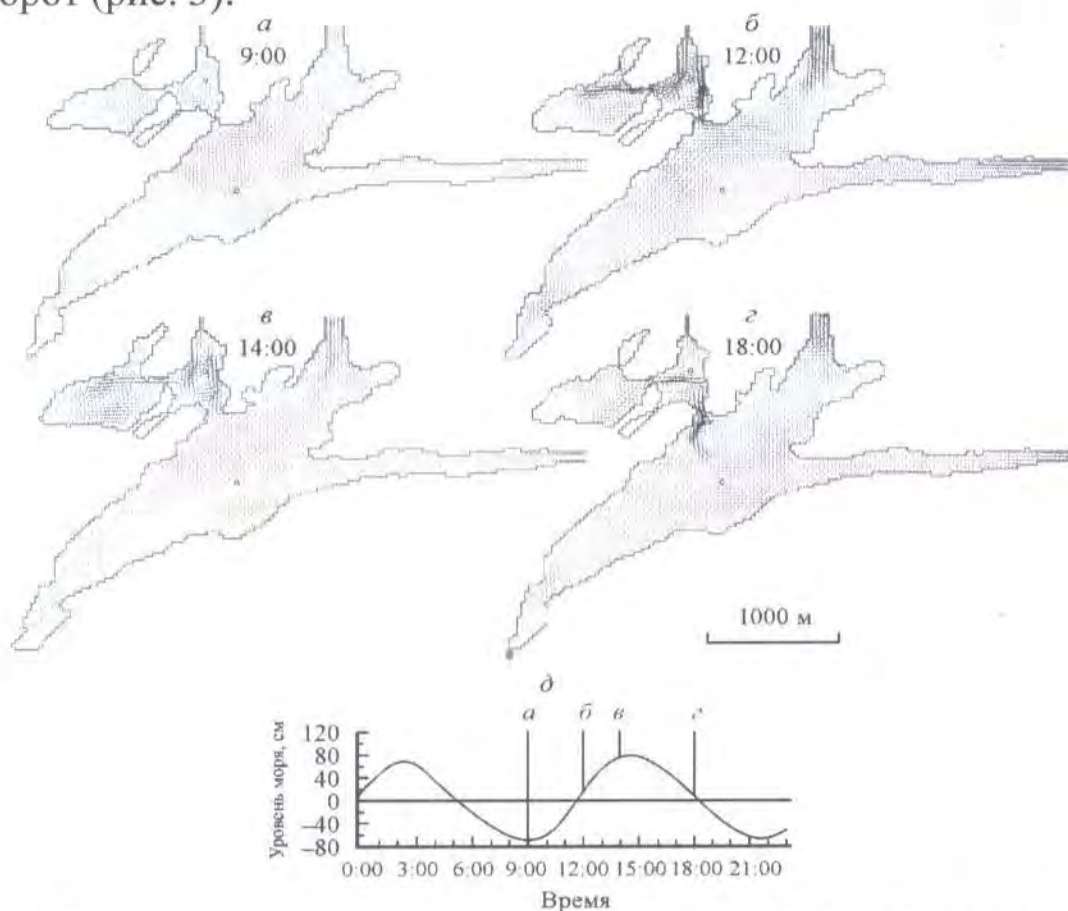


Рис. 5. Приливные течения и колебания уровня моря в губе Кереть 10.06.2013г. (по результатам моделирования); *a* – течения в малую воду, *б* – максимальное за цикл приливное течение; *в* – течения в полную воду; *з* – максимальное за цикл отливное течение; *д* – приливные колебания уровня моря.

Результаты численного моделирования показывают, что максимальное за месяц течение (более 80 см/с) может наблюдаться в южной мелководной части пролива Подпахта, примыкающей к губе Кереть. Разнонаправленность течений в проливе Подпахта можно объяснить тем, что примыкающая губа Лебяжья является своего рода аккумулярующим бассейном. В частности, при увеличении приливного уровня, заполнение резервуара губы Лебяжья будет осуществляться потоками вод, поступающих со стороны моря и из губы Кереть. С понижением уровня на соседних акваториях (отлив), накопленная в губе Лебяжья вода устремится обратно (в сторону моря и в губу Кереть), тем самым вызывая в разных концах пролива Подпахта течения разных направлений. При максимальном отливе южная часть Подпахты практически полностью пересыхает, течение в губу Кереть прекращается, и вода вытекает (вплоть до начала прилива) только через северную часть.

В системе Подпахта – губа Лебяжья можно предположить существование двух циклонических циркуляций, связанных с остаточными приливными течениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Реализован новый подход к исследованию малых приливных эстуариев в условиях ограниченного отрезка времени наблюдений.

2. Для летнего сезона в устьевой области р. Кереть впервые определён приливной режим:

- получены новые гармонические и негармонические постоянные для уровня моря и приливных течений; полусуточные гармоники обеспечивают более 95% дисперсии колебания уровня моря;
- установлено, что колебания уровня происходят синхронно на всей акватории;
- рассчитанное соотношение амплитуд обертона главной лунной полусуточной гармоники M_4 и самой волны M_2 (0,12) можно использовать в качестве критерия вклада нелинейных приливных явлений в динамику эстуарных вод;
- приливная волна в губе Кереть имеет признаки волны стоячего типа.

3. Определены особенности гидрологического режима устья р. Кереть.

В летний сезон для устья р. Кереть характерна устойчивая стратификация и можно выделить верхний распреснённый слой и

глубинные воды с прослойкой галоклина между ними. Особенно активна динамика вод в зоне смешения, где в зависимости от фазы прилива происходят горизонтальные смещения гидрофронта и вертикальные флуктуации галоклина. Они подтверждаются результатами контактных и бесконтактных измерений. Благодаря приливному воздействию, распреснение может проникать до глубины 2-2,5 м. В наиболее глубоких местах эстуария (пролив Средняя Салма), даже в разгар лета, в придонном слое холодная (до 0°C) вода, оставшаяся с зимы, перемешивается с вышележащими водами только с наступлением осенней конвекции.

4. С помощью натуральных экспериментов и модельных расчётов обнаружены необычные гидродинамические явления в относящимся к Керетской губе проливе Подпахта и губе Лебяжья.

В почти изолированном от эстуария проливе Подпахта с наступлением прилива и за счёт адвекции происходит полная перестройка вертикального распределения температуры и солёности; сначала стратификация нарушается, но затем снова восстанавливается. Опреснение акватории водами, поступающими с речным стоком, происходит непостоянно. Разнонаправленность приливных течений в проливе Подпахта, объясняются тем, что он соединён с губой Лебяжья (своего рода аккумулярующий бассейн), а с южной стороны отделён от губы Кереть перемычкой, осыхающей при отливе. При увеличении уровня прилива воды в Подпахту текут из губы и со стороны моря – резервуар губы Лебяжья наполняется. С понижением уровня прилива накопленная вода устремляется обратно, вызывая в разных концах пролива Подпахта разнонаправленные течения. Расчёты на гидродинамической модели РОМ показывают наличие остаточной приливной циркуляции в губе Лебяжья.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы в рецензируемых журналах по перечню ВАК:

1. *Смагин Р.Е., Ионов В.В., Пряхина Г.В., Фёдорова И.В.* Исследование зон смешения в устьевой области р. Кереть Белого моря // Изв. РГО, 2009, т.141. Вып.2. С.63-70.
2. *Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е.* Новые гармонические постоянные приливных колебаний уровня моря в губе Кереть Белого моря по данным экспедиционных работ 2011 года // Вестник СПбГУ. Серия 7. 2013. Вып.2. С.94-108.

3. *Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е.* Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) // Изв. РГО, 2015, т.147. Вып.2. С.22-37.

4. *Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е.* Течения в проливах губы Кереть // Вестник СПбГУ. Серия 7. 2016. Вып.1. С.73-89.

Работы в других изданиях:

1. *Бобров Н.Ю., Крылов С.С., Пряхина Г.В., Фёдорова И.В., Смагин Р.Е., Дмитриев В.В.* Георадиолокационные исследования галоклина в устьевой зоне р. Кереть // Географические и геоэкологические аспекты развития природы и общества: сборник научных статей по материалам отчетных научно-практических конференций 2006-2007 г., Санкт-Петербург, 2008. С. 357-372.

2. *Крылов С. С., Бобров Н. Ю., Киселев Е. Ю., Петлеваный Д. И. Пряхина Г. В., Смагин Р. Е.* Георадарные технологии при изучении динамических процессов в устьевых областях // Труды ГОИН. 2011. Вып. 213. С.356-368.

3. *Смагин Р.Е.* Исследование взаимодействия речных и морских вод в устьевой области небольшой реки (на примере р.Кереть Белого моря) // Изучение и освоение морских и наземных экосистем в условиях арктического и аридного климата. Материалы международной конференции. Ростов-на-Дону, 2011. С.210-213.

4. *Ионов В.В., Май Р.И., Крылов С.С., Пряхина Г.В., Смагин Р.Е.* Исследование распространения и трансформации речных вод в приливном эстуарии // Экологическая безопасность приморских регионов (порты, берегозащита, рекреация, марикультура). Материалы Международной научной конференции, посвященной 150-летию Н.М. Книповича. Ростов-на-Дону, 2012. С.108-111.

5. *Смагин Р.Е.* Исследование распространения и трансформации речных вод в устье реки Кереть // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Материалы научной конференции. Петрозаводск, 2013. С. 271 -274.

6. *Колдунов А.В., Петросян Н.В., Смагин Р.Е.* Проблемы и перспективы изучения Белого моря из космоса // Природное и культурное наследие Белого моря: перспективы сохранения и развития. Материалы научно-практической конференции. Чупа, 2015. С. 24-25.

7. *Смагин Р.Е.* Некоторые результаты океанологических исследований в районе Карельского берега Белого моря // Экологическая стратегия развития прибрежных регионов: география, окружающая среда, население. Материалы Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону, 2015. С.177-186.

8. *Smagin R. E., Stulgaitė A. A.* Investigation of the distribution and transformation of the river waters in the mouth area of the river Keret // International seminar «Transboundary watershed territories: Finland and Russia – White Sea watershed» . Petrozavodsk. IVPS. 2013. 1-2 p.