

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

УДК 556.54

ЛЕБЕДЕВА Серафима Витальевна

**ДИНАМИКА ПОТОКА В ПРИЛИВНОМ МНОГОРУКАВНОМ УСТЬЕ
КРУПНОЙ РЕКИ (НА ПРИМЕРЕ Р. СЕВЕРНАЯ ДВИНА)**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **АЛАБЯН Андрей Михайлович**
кандидат географических наук

Официальные оппоненты: **КОРОБОВ Владимир Борисович**
доктор географических наук,
директор Северо-западного отделения Института океанологии РАН имени П.П. Ширшова
(г. Архангельск)

АРХИПОВ Борис Витальевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий сектором математического моделирования водных систем ФИЦ «Информатика и управление» РАН (г. Москва)

Ведущая организация: **Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова** (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится **2 июня 2016 г. в 15 часов** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, МГУ ГЗ, географический факультет, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Фундаментальной научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27, А-8) и на сайте МГУ (<https://istina.msu.ru/dissertations/18935645/>). Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, МГУ ГЗ, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68; e-mail: science@geogr.msu.ru; факс: +7 495 9328836.

Автореферат разослан **марта 2016 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Многорукавные приливные устья – наиболее сложные гидрологические объекты с точки зрения динамики потока. Их исследования всегда были сопряжены со значительными трудозатратами, особенно с учетом того, что большая часть приливных устьев в России – это устья рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, и рек Дальнего Востока, труднодоступные для экспедиционных исследований. Многие устья крупных рек до сих пор остаются малоизученными, несмотря на то, что в них расположены важные морские и речные порты, а методики гидрологических исследований в устьевых областях разрабатываются с первой половины XX века.

В последние годы значительно возрос интерес к изучению Арктики в связи с тенденциями освоения ресурсов арктического шельфа и транспортными проблемами России. Решение связанных с этим задач требует подробного изучения побережья, в том числе северных устьев крупных рек.

Динамика потока – одна из основ всего комплекса устьевых процессов. Выявление режимов уровней воды, скоростей течения и расходов воды первоначально при организации полевых наблюдений в устьевой области.

Сокращение наблюдательной сети устьевых станций за последние 30 лет в условиях увеличения антропогенной нагрузки и изменений климата обуславливает необходимость оптимизации и модернизации методов наблюдений и исследований.

Численное гидродинамическое моделирование представляется эффективным способом восполнить недостаток натуральных данных. Оно позволяет перейти от рассмотрения гидрологической ситуации в дискретные временные срезы к ее континуальному пространственно-временному.

В октябре 2011 г. в Государственном океанографическом институте им. П.П.Зубова (ГОИН) прошло пятое Совещание-семинар по проблемам состояния наблюдений и исследований морских устьев рек. По инициативе Арктического и Антарктического научно-исследовательского института

(ААНИИ) одним из основных был рассмотрен вопрос о внедрении технологии оперативного мониторинга устьевых процессов на базе комплекса натуральных наблюдений и математического моделирования.

При построении модели течений каждый объект требует специфического подхода. К главным особенностям приливных устьевых областей относится наличие дельты, воздействие приливов на уровни воды, пульсации и смена направления и скоростей течения на устьевом участке реки.

Выбор устья Северной Двины в качестве объекта исследования и демонстрации возможностей представляемой методики определен тем, что оно, с одной стороны, обладает сложной гидрографической сетью и многофакторным режимом динамики потоков, а с другой стороны, наиболее доступно для полевых исследований и относительно хорошо изучено [Гидрология устьевой области ... , 1965; Шевченко, 2013] по сравнению с другими многорукавными приливыми устьями рек России.

История и **степень разработанности темы исследования** подробно изложены в главе 1 диссертационной работы.

Цель работы – разработать методику комплексного анализа динамики потока в многорукавном приливном устье крупной реки, основанную на сочетании современных методов гидрологических исследований (полевые работы, моделирование, ГИС, анализ ДЗЗ) и **продемонстрировать** ее возможности на примере устьевой области Северной Двины.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

- сбор и обобщение данных о методах и результатах предшествующих исследований динамики потоков в приливых многорукавных устьях крупных рек;

- исследование особенностей гидрологического режима устьевой области Северной Двины и выбор математической модели, подходящей для изучения движения водного потока в ее пределах;

- разработка компьютерной гидродинамической модели устья Северной Двины, ее калибровка и верификация на основе натурных данных, определение границ применимости модели и спектра воспроизводимых гидрологических явлений;

- сценарное моделирование типичных и опасных гидрологических ситуаций, таких как половодье, межень, нагон;

- анализ изменения гидродинамических характеристик в пределах устьевой области в приливном и синоптическом масштабе времени.

Предмет исследования – динамика потока в многорукавном приливном устье крупной реки в разных гидрологических условиях: приливных, бесприливных, нагонных; пространственно-временная изменчивость гидродинамических характеристик (уровень воды, уклон водной поверхности, скорости течения, распределение расходов воды по рукавам).

Объект исследования – устьевая область Северной Двины.

Методы исследования. В работе используется сочетание методов экспедиционных исследований и математического моделирования. За последние десятилетия появился целый ряд новых полевых методов и приборов, позволяющих получать большие объемы фактических данных принципиально нового качества: дифференциальные системы спутникового позиционирования (DGPS), автоматические цифровые регистраторы уровня воды (логгеры) и акустик-доплеровские измерители течений (ADCP). Полученные с помощью этих инструментов массивы данных используются для калибровки и верификации двумерной нестационарной гидродинамической модели STREAM_2D [Беликов, Кочетков, 2014] при динамичных граничных условиях. Использование модели позволяет выполнить пространственно-временной анализ изменений гидрологических характеристик в пределах устьевой области.

Источники информации:

- научная и справочная литература, Интернет;

- гидрологические и морские ежегодники;
- топографические и навигационные карты, космические снимки устьевой области Северной Двины;
- результаты полевых работ экспедиции ГОИНа и Северодвинской устьевой станции (СДУС) 2013 г. (с участием автора);
- фондовые материалы Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, Архангельского филиала ФГУП «Росморпорт», Архангельского филиала ФБУ «Администрация «Севводпуть», Северного УГМС.

Научная новизна. Работа является качественно новой в условиях современного развития вычислительной техники и гидрологических измерительных приборов.

С использованием откалиброванной и верифицированной модели по эпизодическим гидрологическим измерениям воспроизведена континуальная картина динамического взаимодействия речных и морских водных потоков в устье Северной Двины в нагонных, приливных и бесприливных условиях. Продемонстрирована эффективность использования полученной модели для проведения анализа динамики потока и развития опасных гидрологических явлений в приливном устье. По результатам моделирования для различных фаз водного режима выявлена взаимосвязь распределения стока по рукавам дельты Северной Двины от среднего уровня моря и от параметров приливных колебаний уровня воды на морском крае дельты.

Основные защищаемые положения:

1) методика исследования динамики потоков в многорукавном приливном устье крупной реки, основанная на сочетании компьютерного моделирования и современных методов полевых гидрологических исследований;

2) двумерная плановая модель течений на устьевом участке Северной Двины (от Усть-Пинеги до морского края дельты), адекватно отражающая ход

уровней воды и пространственную картину течений в синоптическом и приливном масштабе времени;

3) результаты расчетов экстремального половодья (с максимальным расходом 1% обеспеченности) и катастрофического нагона (на примере 15–16 ноября 2011 г.);

4) зависимости распределения стока воды по рукавам дельты и дальности распространения приливных колебаний уровня от расхода воды Северной Двины и уровня моря.

Достоверность результатов исследования обусловлена тем, что работа выполнена на основе обработки надежного массива данных наблюдений за гидрологическим режимом устьевой области Северной Двины. Достоверность результатов моделирования подтверждается высокой сходимостью рассчитанных величин с результатами полевых наблюдений, которая подтверждается статистическими критериями.

Практическая значимость работы. В устье Северной Двины расположен крупный водотранспортный узел Европейского севера России – город Архангельск, а также центр судостроения и судоремонта Северодвинск. Берега дельтовых рукавов и протоков в значительной степени освоены, на них располагаются лесозаготовительные и лесоперерабатывающие предприятия.

Разработанная модель устья Северной Двины может использоваться для определения дальности проникновения приливных колебаний уровня воды и обратных течений вверх по руслу реки, распределения расходов воды по рукавам дельты при различных сочетаниях морского и речного факторов (расхода воды в Усть-Пинеге и уровней воды на морском крае дельты) как в естественных условиях, так и при проведении гидротехнических мероприятий (дноуглубление, перекрытие отдельных протоков и т.п.).

Модель может быть использована для ретроспективного, сценарного и упреждающего моделирования развития опасных гидрологических процессов. В сочетании с океанологическими и метеорологическими моделями, а также моделью формирования стока с водосбора Северной Двины, она может стать

частью системы оперативного прогнозирования наводнений, воспроизводя картину распределения гидродинамических параметров потока в пределах устьевой области.

Представленная методика может быть основой для оптимизации гидрологических наблюдений и исследований на малоизученных устьевых областях со сложным гидродинамическим режимом. По результатам ее реализации для устьевой области Северной Двины в работе представлены рекомендации по оптимизации наблюдений за динамикой потока в этом устье.

Результаты работы используются при выполнении проекта РФФИ «Исследование динамики приливных волн и сгонно-нагонных явлений в устьях рек бассейна Белого моря» (№16-05-01018 А), а также проектов РФ «Изменения окружающей среды в Арктике и их влияние на население и хозяйство» (№14-37-00038) и «Параметризация характеристик речного стока для диагностики возникновения опасных гидрологических явлений и их экологических последствий» (№14-17-00155).

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях:

Международная научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2012), VIII общероссийская конференция изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2012), Всероссийская научная конференция «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» (Краснодар, 2013), X юбилейная всероссийская конференция с международным участием «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2014), IV международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование (MARESEDU)» (Москва, 2015), Международная научно-практическая конференция «Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии» (Санкт-Петербург, 2015).

Кроме того, работа была представлена на оперативно-производственном собрании Гидрометцентра Северного УГМС (Архангельск, 2015) и на научном семинаре в ГОИНе (Москва, 2015).

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем диссертации 211 страниц, основной текст изложен на 163 страницах и содержит 26 таблиц и 56 рисунков. Список литературы включает 170 наименований, в том числе 36 на иностранном языке.

Автор выражает благодарность доктору географических наук профессору Н.И. Алексеевскому, сотрудникам кафедры гидрологии суши, доценту Д.В. Магрицкому, к.г.н. с.н.с. И.Н. Крыленко, сотруднику ИВП РАН доктору технических наук В.В. Беликову за ценные советы и критические замечания, заведующему лабораторией морских устьев рек ГОИН к.г.н. В.Ф. Полонскому за предоставленную возможность участвовать в экспедиции и доступ к многолетним данным наблюдений, сотруднику ГОИН О.Н. Горелиц за консультации и ценные советы, начальнику отдела морских и речных прогнозов Северного УГМС Е.Н. Скрипник за предоставленные материалы, консультации, сотруднику НИЛ эрозии почв и русловых процессов к.г.н. С.Н. Рулевой, начальнику службы морских каналов Архангельского филиала ФГУП «Росморпорт» А.Ю. Богунову за предоставленные материалы наблюдений, сотрудникам Архангельского филиала ФБУ «Администрации «Севводпуть».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены методы и источники исходной информации, обозначены научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации работы и о структуре и объеме диссертации.

В главе 1 «История и современное состояние исследований динамики потока в многорукавных приливных устьях рек» рассмотрено состояние изученности темы исследования, в том числе история становления устьевой гидрологии в России как научного направления.

До середины XX в. исследования в устьях рек были связаны в основном с развитием морских портов и обеспечением судоходства. В 1950-е гг. в СССР началась реализация обширной программы по устьевым исследованиям под контролем ГОИНа и ААНИИ. Основой фактически нового направления в гидрологии стало комплексное восприятие устьевой области как сложного природного объекта, устьевые процессы в котором есть результат взаимодействия целого ряда факторов.

В главе 1 также приведен краткий обзор применения расчетных методов гидравлики и численного моделирования в исследованиях динамики потоков многорукавных и приливных устьевых областей, представлен анализ работ отечественных и зарубежных авторов по исследованию динамики потоков в устьях рек за последние 10-15 лет, приведены основные классификации устьевых процессов, динамики вод и типизация устьев рек.

Что касается современного состояния сети наблюдений в устьях рек, в последние годы ввиду революционного прорыва в деле разработки и внедрения новейшего гидрометрического и геодезического оборудования появилась возможность выполнять гидрологические исследования в устьях на принципиально новом уровне.

В главе 2 «Изученность гидрологического режима устьевой области Северной Двины». Устьевая область Северной Двины – одно из самых изученных приливных устьев крупных рек в России и в мире (рисунок 1). Освоению и исследованиям гидрологии устья Северной Двины способствовало то, что с XVI в. в нем расположен крупный речной и морской порт Архангельск. Большая часть исследований до середины XX в. была связана с прикладными задачами порта. В 1930-е гг. начинает работу Северо-Двинская устьевая станция (СДУС), работающая по программе регулярных наблюдений

за гидрологическими характеристиками. В 1950-е гг. СДУС становится частью целой сети устьевых станций на крупных реках Советского Союза.

Устьевая область Северной Двины (рисунок 2) охватывает участок реки длиной 135 км по фарватеру судового хода от впадения реки Пинеги до морского края дельты (устьевой участок реки), а также юго-восточную часть Двинского залива (устьевое взморье). Устьевое взморье относится к типу открытого приглубого взморья и занимает вершину Двинского залива. Дельта Северной Двины является дельтой выдвигения на первой стадии выполнения залива. Дельта имеет форму, близкую к равностороннему треугольнику со стороной 45 км. В сложной разветвленной сети водотоков дельты (рисунок 2) выделяются три главных рукава – Никольский, Мурманский и Корабельный, и две крупные протоки – Кузнечиха и Маймакса, по которой проходит большая часть основного судового хода через дельту.

Северная Двина – река с весенним половодьем и преобладающим снеговым питанием. Около 50 % стока приходится на период с мая по июнь, за период с июля по ноябрь на каждый месяц приходится не более чем 8% годового стока. Самые маловодные месяцы зимней межени с декабря по март дают около 2–3 % стока каждый. В осенний период часто проходят дождевые паводки с повышенным стоком по сравнению с зимней и летней меженью. В вершине устьевой области в с. Усть-Пинега расположен створ опорного гидрологического поста, на котором с 1925 г. измеряют расходы воды. Норма стока для этого поста составляет 3330 м³/с, средний максимальный расход – около 21500 м³/с. Расчетное значение максимального расхода воды 1% обеспеченности – 33000 м³/с.

Расходы воды и относительная водоносность рукавов дельты зависят от величины речного стока в вершине устьевой области, морфометрии рукавов, а также от уровня воды на морском крае дельты (среднего уровня и амплитуды колебаний).

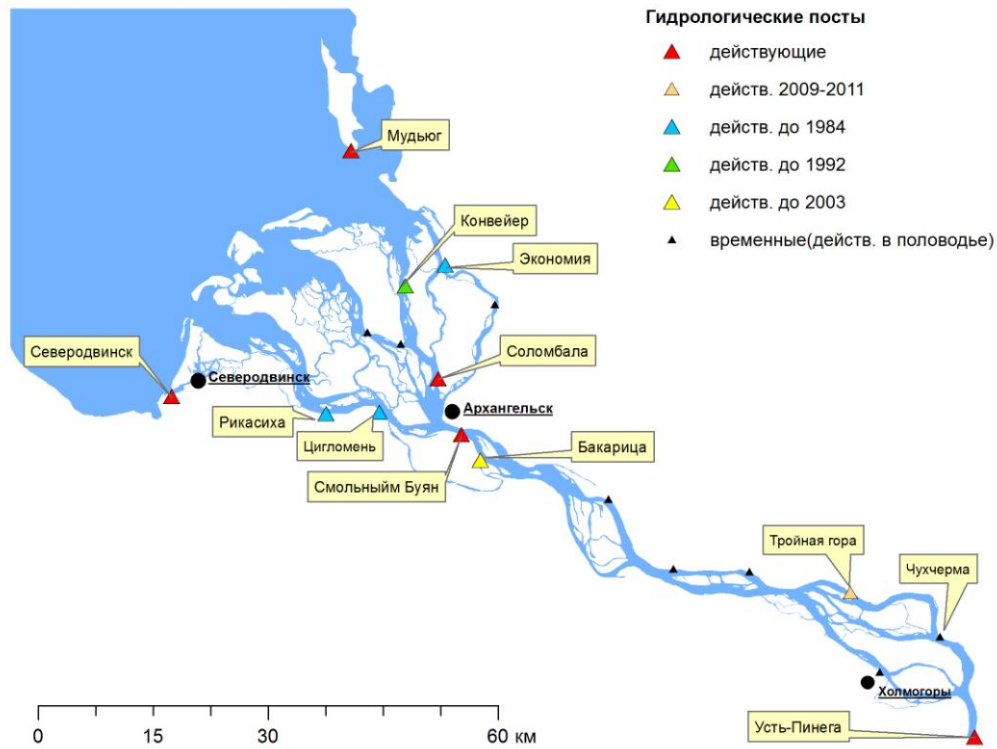


Рисунок 1 – Гидрологические посты в устьевой области Северной Двины

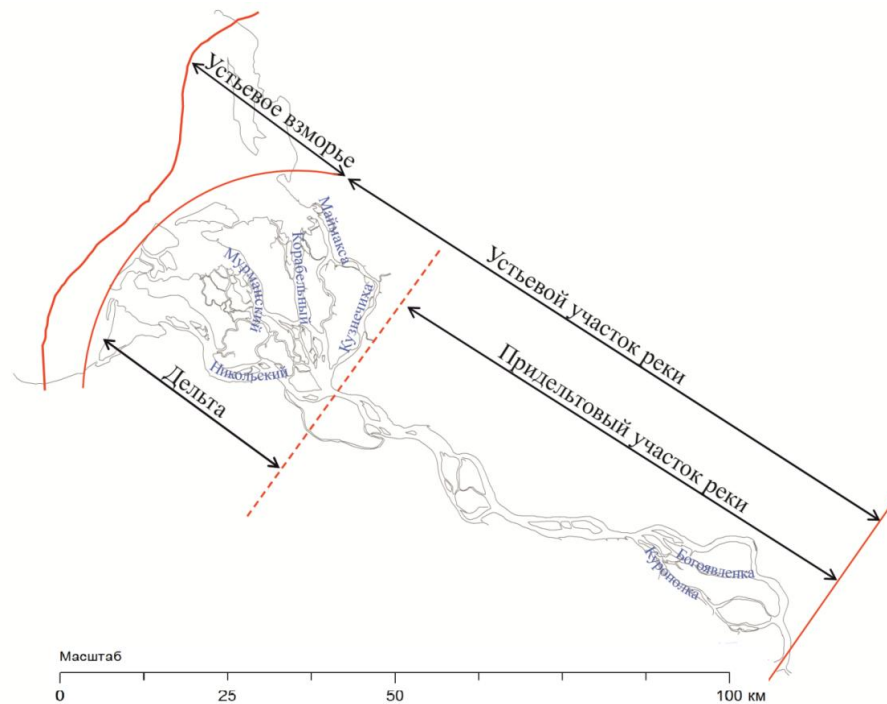


Рисунок 2 – Районирование устьевой области реки Северная Двина

Под действием приливных колебаний происходят периодические изменения расходов воды в рукавах, а под действием сгонно-нагонных явлений – непериодические. Диапазон изменений расходов воды в ходе приливного

цикла как в рукавах, так и в вершине дельты может достигать величины в несколько раз большей, чем средний за приливный цикл стоковый расход воды. Измерения расходов воды в рукавах дельты связаны с организационно-техническими сложностями из-за необходимости проведения измерений одновременно во всех рукавах и в течение всего приливного цикла. Подобные работы организовывались и проводились в дельте Северной Двины всего несколько раз за всю историю исследований. По разным оценкам распределение расходов воды по рукавам дельты в межень следующее: Кузнечиха: от 1 до 5 %, Маймакса: от 8 до 20 %, Корабельный рукав: от 14 до 25 %, Мурманский рукав: от 18 до 28 %, Никольский рукав: от 25 до 44 %.

Уровенный режим в пределах устьевой области Северной Двины формируется в результате взаимодействия речных и морских факторов:

$$H = H_{\text{ст}} + \Delta H_{\text{зат}} + \Delta H_{\text{пр}} + \Delta H_{\text{наг}}$$

где $H_{\text{ст}}$ – уровень, сформированный текущим расходом воды в реке («стоковый»), $\Delta H_{\text{зат}}$ – добавка, за счет заторных явлений, $\Delta H_{\text{пр}}$ – приливная составляющая, $\Delta H_{\text{наг}}$ – нагонная составляющая.

В устье Северной Двины период приливных колебаний уровня воды составляет около 12,5 часов. На морском крае дельты величина сизигийного прилива составляет 1,25–1,5 м, квадратурного – 0,6–0,8 м.

Нагоны в устье Северной Двины формируются при сильных северо-западных ветрах. Средняя величина нагонов составляет около 1 м. Сгоны образуются при сильных ветрах южных румбов, наиболее часто, как и нагоны, случаются в сентябре и октябре. Наибольшие сгоны имели величину 90 см у о. Мудьюг и 80 см в Соломбале.

Момент вскрытия ледового покрова почти совпадает с резким увеличением стока весеннего половодья. Разрушению льда способствует подъем уровня воды. В результате часто образуются ледовые заторы, особенно в рукавах крупных разветвлений и в дельте. Благодаря искусственному разрушению льда в весенний период число заторов в дельте в последние десятилетия резко сократилось.

2–3 раза в столетие проникновение соленых воды в дельту бывает опасным для водоснабжения города Архангельска и функционирования промышленных предприятий. Осолоненная морская вода достигает устьевых створов при расходе порядка $10000 \text{ м}^3/\text{с}$. С уменьшением расходов воды до средних межених дальность проникновения соленых вод достигает 15 км от устьевых створов. При расходах воды меньше $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ дальность проникновения соленых вод неустойчива и сильно подвержена влиянию приливов и сгонно-нагонных течений. При максимальных расходах воды в весеннее половодье порядка $20000\text{--}22000 \text{ м}^3/\text{с}$ морская вода полностью вытесняется из рукавов дельты в сторону Двинского залива за пределы устьевых баров.

Глава 3 «Комплексная методика исследования динамики потока в многорукавном приливном устье крупной реки». Концепция комплексной методики исследования многорукавных приливных устьев крупных рек, представляемая в работе, основана на сочетании методов компьютерного моделирования, полевых измерений и использования данных ДЗЗ. Каждая устьевая область в своем роде уникальна и требует индивидуального подхода к разработке модели и программы наблюдений.

В начале исследования реализуется тестовая версия гидродинамическом модели, для чего используются все возможные данные и представления о данной устьевой области. На основе тестовых расчетов на такой модели формируется план-программа экспедиции и осуществляются натурные измерения, в результате которых появляется возможность уточнения рельефа, калибровки и верификации модели. На этом же этапе может быть сформировано обоснование схемы расположения постоянных постов наблюдений за уровнями и расходами воды.

Далее по мере получения необходимых натуральных данных и соответственно ставящимся задачам модель детализируется и уточняется, а главное – калибруется и верифицируется на независимом материале.

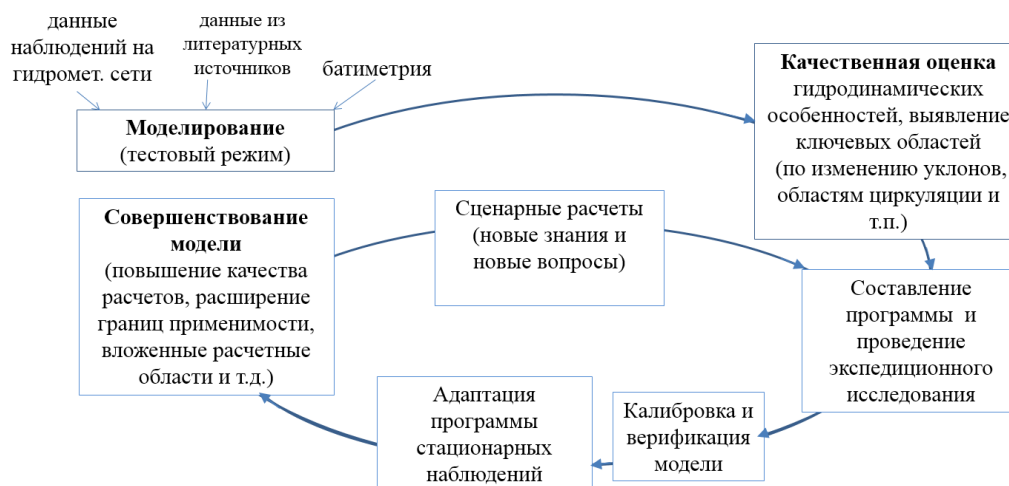


Рисунок 3 – Концепция методики исследования динамики потока в устьевой области

Полного соответствия смоделированных и измеренных скоростей течения и уровней водной поверхности на всем пространстве модельного участка при всех воспроизводимых гидрологических ситуациях осуществить невозможно. Однако с каждой новой апробацией проясняется понимание границ применимости той или иной модификации модели в принципе. При этом сам процесс разработки и настройки модели помогает сформировать программу дальнейших натурных исследований.

В главе 3 также представлены основы (и особенности для устьевых областей) составляющих частей общей методики:

1) даны представления о компьютерном гидродинамическом моделировании, его математической основе, дан обзор существующих программных комплексов и этапы адаптации модели под конкретный природный водный объект (устьевую область);

2) описаны методы полевых исследований, рекомендуемые для применения в устьях рек с нестационарным режимом по существующим методическим рекомендациям, а также с учетом возможностей современных приборов;

3) представлен перечень возможностей эффективного применения данных дистанционного зондирования при работе с моделью устьевой области.

Глава 4 «Гидродинамическая модель устьевого участка Северной Двины». Цель моделирования – воспроизведение характеристик динамики потока на устьевом участке реки (распределение расходов воды по рукавам, уровни и уклоны воды, направления и скорости течения) в приливном и синоптическом масштабах времени. В задачи моделирования входит настройка модели, как можно более детальная калибровка и верификация, оценка ее возможностей и ограничений. Сценарные расчеты выполнены, проанализированы и описаны в главе 5, исходя из результатов этой оценки.

Для воспроизведения учитываемых устьевых процессов в устье Северной Двины выбрана однослойная двумерная плановая реализация численной гидродинамической модели, основанная на решении уравнений «мелкой воды» STREAM_2D. Выбор обусловлен соотношением ширины и длины русел рукавов, а также подробностью и количеством имеющейся информации о рельефе, уровнях и расходах воды.

В современной версии модели устья Северной Двины не учитывается транспорт наносов, переформирования рельефа дна, не принимаются во внимание динамические эффекты, связанные с разной плотностью морских и речных вод, и проникновение осолоненных вод внутрь устьевого участка реки. На модели реализуются расчеты только для безледного периода.

Верхняя граница области моделирования расположена в створе поста Усть-Пинега, на ней задаются расходы воды. Нижняя граница представляет собой полукруглую линию вдоль морского края дельты, проведенную в 2-4 км от него в сторону моря. По краям этой линии находятся морские водомерные посты Северодвинск и Мудьюг, по которым задаются уровни воды. Таким образом, уровни воды на нижней границе почти не зависят от величины расхода воды на верхней границе, и наоборот.

Рельеф суши задан в модели по результатам оцифровки топографических карт, батиметрия русел – по лоциям, морским навигационным картам, специальным планам русел и т.д.

На область моделирования построена нерегулярная гибридная расчетная сетка, состоящая из 199 тысяч ячеек: четырехугольников, приуроченных к руслам значимых водотоков, и треугольников на остальной площади. Линейные размеры ячеек изменяются от 10 м в руслах до 100-200 м на пойме и взморье (рисунок 4).

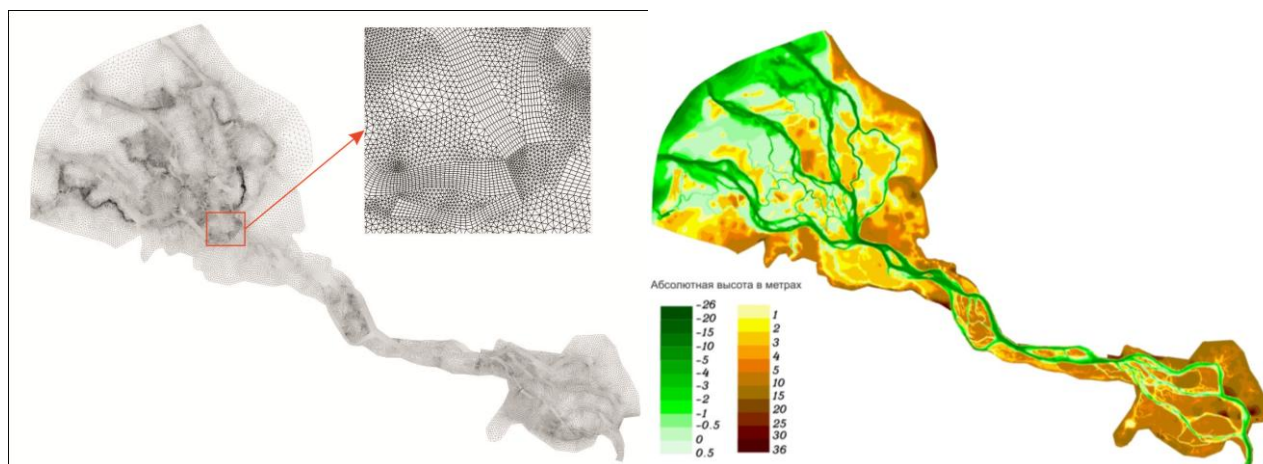


Рисунок 4 – Расчетная сетка и основанная на ней цифровая модель рельефа устьевой области Северной Двины

Важная составляющая методики – детальная калибровка и верификация модели. Для калибровки и верификации уровней воды использовались данные с постов Рикасиха, Конвейер, Экономия, Соломбала, Смольный Буян, Усть-Пинега. Это непрерывные данные записей самописцев, уровни и время наступления полных и малых вод, публикуемые в морских ежегодниках, среднесуточные данные.

Калибровка и верификация расходов воды проводилась по данным измерений расходов в рукавах дельты в течение всего приливного цикла во время экспедиции ГОИНа и СДУС в 2013 г. (с помощью ADCP), в которой принимал участие автор работы. Также во внимание принимались полученные В.Ф. Полонским связи между расходом в вершине устьевой области и распределением расходов воды по рукавам по результатам обобщения данных обо всех измерениях в рукавах дельты в 1980-е гг., в 1960-е гг. и ранее.

В процессе калибровки параметры модели (коэффициенты шероховатости на разных участках русла и на пойме) подбирались так, чтобы различия между смоделированными и фактическими данными были минимальными. Отдельно калибровка и верификация проводились для условий половодья и для условий межени, соответственно подобраны два набора коэффициентов шероховатости. Калибровка и верификация проводились на независимых друг от друга наборах фактических данных (для задания граничных условий и сопоставления фактических и смоделированных характеристик).

В результате верификации уровней воды в межень и в половодье среднеквадратическая ошибка составила от 5 до 20 см и до 20-30 см в специфических условиях наложения нагона на волну половодья.

Ход расходов воды в течение приливного цикла в межень в рукавах дельты сопоставлен с натурными измерениями в 2013 г. Основные черты, такие как смена знака, проявления манихи (приостановка подъема уровня в прилив), время достижения экстремумов воспроизводятся моделью адекватно.

Средние за приливный цикл расходы воды в рукавах в половодье воспроизводятся с точностью до 3–5 % от общего расхода в вершине устьевой области. В меженных условиях результаты моделирования распределения расходов воды по рукавам получились неудовлетворительными (по результатам и калибровки, и верификации). При этом в процессе калибровки (варьированием коэффициентами шероховатости между русел рукавов) адекватного распределения расходов воды по рукавам достичь не удалось. Специально проведенные расчеты показали большую чувствительность распределения расходов воды по рукавам дельты к способу задания уровня воды на нижней границе модели, а именно – интерполяции уровня вдоль морского края дельты между Северодвинском и Мудьюгом. Также было оценено влияние возможных ошибок в подборе калибровочных параметров (коэффициентов шероховатости), в задании рельефа и в выборе размеров ячеек

сетки на результаты моделирования. Все они оказались менее значимыми по сравнению с влиянием уровня воды на нижней границе модели.

Глава 5 «Динамика потока на устьевом участке реки Северной Двины по результатам моделирования». В последней главе представлены результаты моделирования динамики потока в типичных и экстремальных гидрологических ситуациях в устьевой области Северной Двины.

Для типичного приливного цикла в межень (на примере 16–17 июля 2013 г.) были построены и проанализированы схемы распределения удельных расходов воды и направлений течения на каждый из 12 часов приливного цикла (рисунок 5). Выявлены моменты появления и перемещения зон переменных течений в рукавах дельты и на придельтовом участке. Вначале 7-го и 8-го часов (за начало приливного цикла принят момент наступления малой воды в Северодвинске) выявлено формирование дополнительных зон переменных течений на устьевом участке реки, которые вызваны манихой. Такие зоны формируются в Корабельном рукаве, протоках Маймакса и Кузнечиха. На 10-м часе образуются новые зоны переменных течений в рукавах дельты в связи с началом отлива на морском крае, в то время как основная (первая) зона переменных течений продвигается вверх по придельтовому участку реки.

Моделирование экстремального ветрового нагона 15–16 ноября 2011 г. в устье Северной Двины показало, что на первом из двух экстремальных пиков уровня воды почти на всей устьевой области (до 114 км) наблюдался обратный уклон водной поверхности (в среднем 0,6 см на 1 км) и значительные обратные скорости течения (в сторону реки). На втором пике нагона устьевая область оказалась заполненной водой, а уклон водной поверхности – близким к нулю. Скорости течений при этом на большей части устьевого участка были минимальны и близки к нулю. Построены схемы удельных расходов воды и направлений течения на соответствующие моменты времени (рисунок 5).

По результатам моделирования экстремального нагона и затопления дельты речными водами при прохождении расхода воды 1% обеспеченности построены схемы глубин затопления в дельте, которые могут быть уточнены

без внесения изменений в модель путем улучшения точности и детализации рельефа поверхности поймы и дельты.

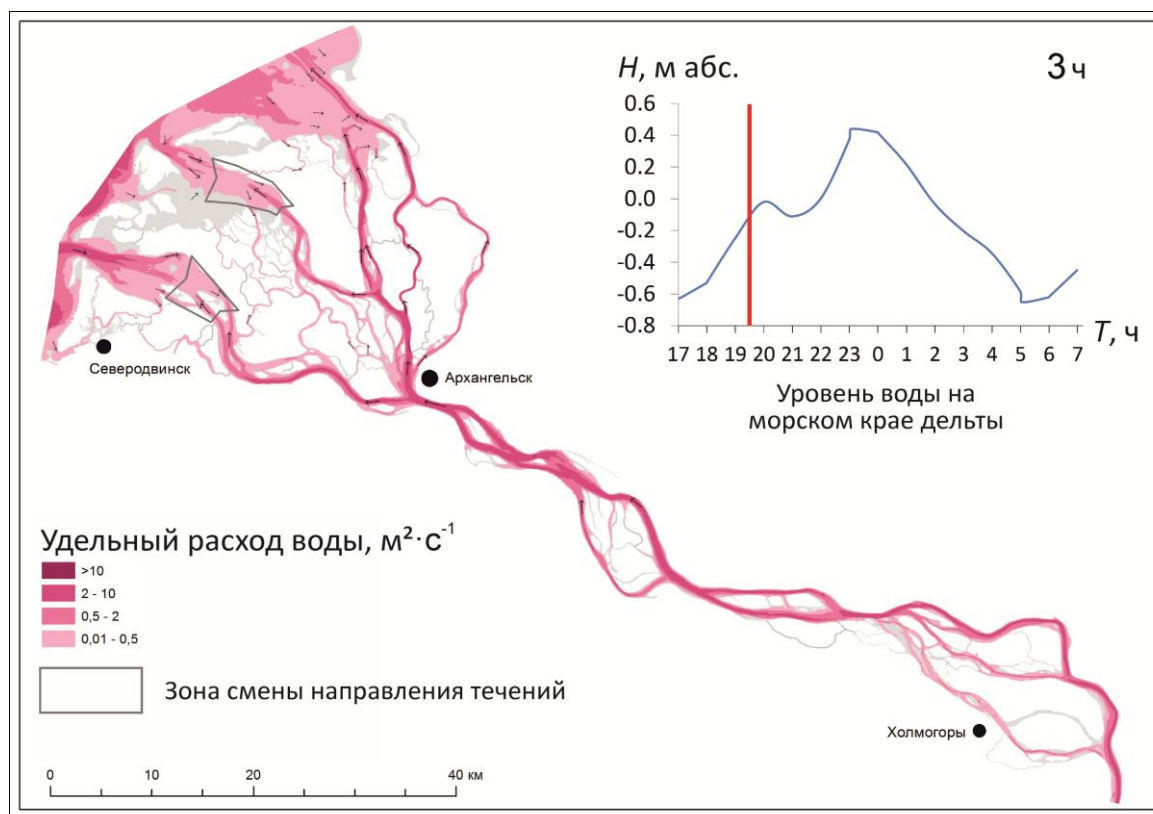


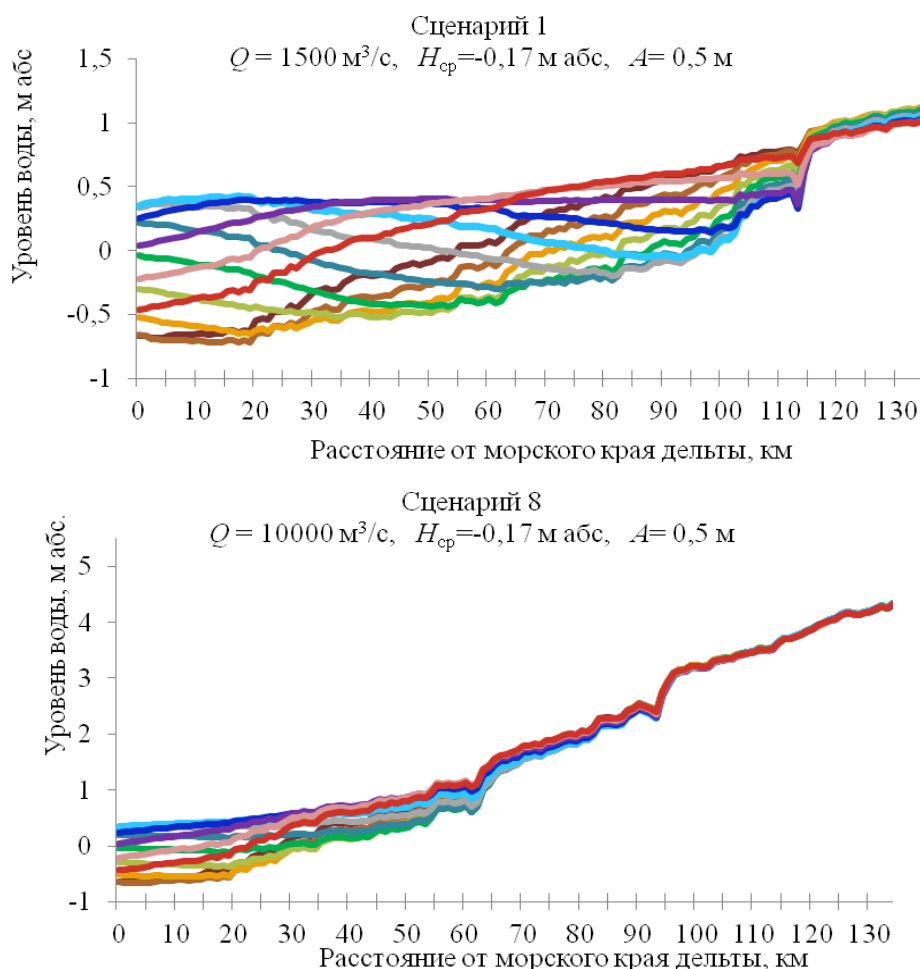
Рисунок 5 – Пример схемы пространственного распределения удельных расходов воды и направлений течения в ходе приливного цикла по результатам моделирования (3-й час приливного цикла)

Рассчитанная зона затопления для экстремального нагона охватывает часть районов Архангельска и Северодвинска, а также многие сельские населенные пункты, расположенные на островах дельты. При прохождении расхода воды половодья 1% обеспеченности картина затопления принципиально отличается. Наибольшему затоплению подвергаются пойменные массивы на придельтовом участке реки.

Выполнено 22 сценарных расчета (рисунок 6), соответствующих разным сочетаниям граничных условий: расход воды на верхней границе (Q), средний за приливный цикл уровень воды ($H_{\text{ср}}$) на нижней границе и амплитуда (A) приливных колебаний уровня воды на нижней границе. Результаты этих расчетов дают представление о зависимости дальности проникновения

колебаний уровня воды ($L_{\Delta H}$) вверх по реке от распределения расходов воды по рукавам дельты от Q , H_{cp} и A .

Оказалось, что при одной и той же амплитуде колебаний уровня воды на морском крае дельты (A) и изменении уровня моря (H_{cp}) от -0,4 до 0 м абс, $L_{\Delta H}$ сдвигается не более, чем на 2 км.



Номер расчетного часа

— 1 — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7 — 8 — 9 — 10 — 11 — 12

Рисунок 6 – Примеры результатов сценарных расчетов: продольные профили уровня воды вдоль судового хода на каждый из 12 часов приливного цикла

В случае же варьирования амплитудой при фиксированном среднем уровне воды на нижней границе $L_{\Delta H}$ – смещается на 11–16 км. Было установлено, что резкое изменение интенсивности затухания приливных колебаний уровня воды на устьевом участке реки в меженных условиях приурочено к лимитирующему перекаату Юра в Холмогорском разветвлении, а

при больших расходах воды – к местам резкого сужения долины (94 и 62 км от морского края дельты).

Было установлено, что распределение расходов воды по рукавам в меженных (приливных) условиях зависит не только от расхода воды в вершине устьевой области, но и в значительной степени от параметров колебаний уровня воды на морском крае дельты ($H_{\text{ср}}$ и A) (рисунок 8). Увеличение среднего за приливный цикл уровня моря с $-0,4$ до 0 м абс. приводит к увеличению стока в Никольском и Мурманском рукавах, и соответственному уменьшению стока в остальных рукавах. При изменении амплитуды прилива с $0,35$ до $0,75$ м расходы воды в Никольском и Мурманском рукавах увеличиваются, а расходы в остальных рукавах снижаются в два раза.

По результатам моделирования приливного цикла при наиболее типичных меженных условиях стока и приливных колебаниях уровня воды (сценарий 1, $H_{\text{ср}} = -0,17$ м, $A=0,5$ м, $Q=1500$ м³/с) построена схема пространственного распределения величины прилива. Полученная схема может стать основой для районирования устьевое участка Северной Двины по характеру распространения и величине прилива (рисунок 7).

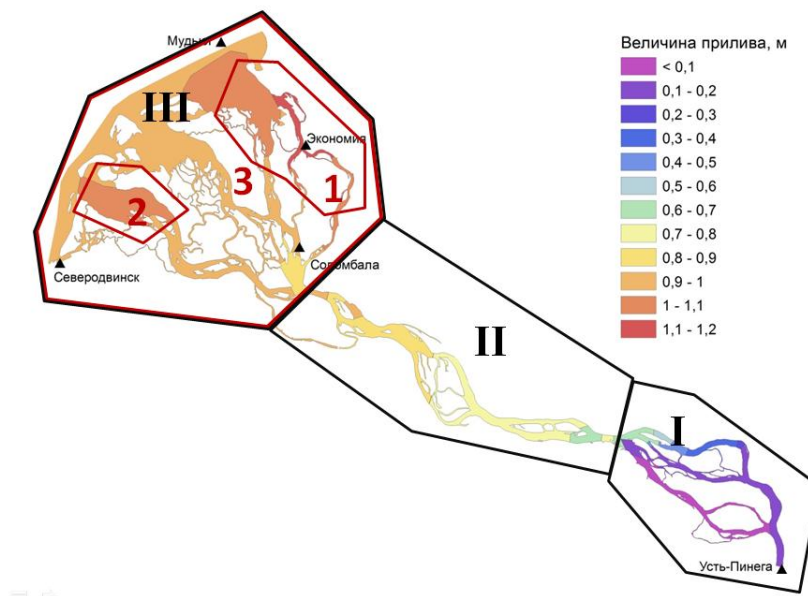


Рисунок 7 – Схема пространственного распределения величины прилива по результатам моделирования (сценарий 1) и районирование устьевое участка Северной Двины по распространению прилива в межень

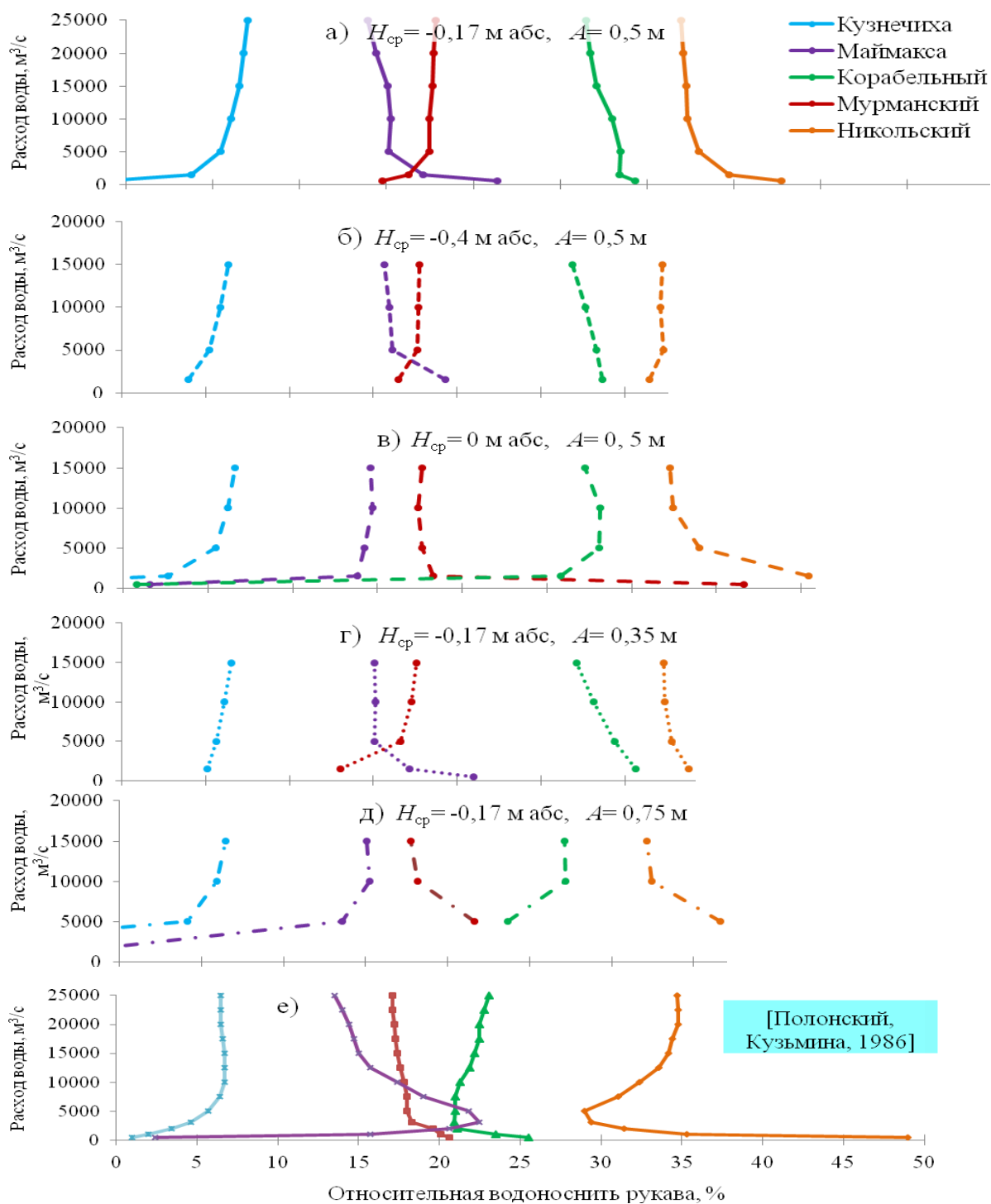


Рисунок 8 – Распределение расходов воды по рукавам дельты в зависимости от расхода воды в вершине устьевой области по результатам моделирования пяти групп сценариев (а-д) и по обобщениям данных об измеренных расходах [Полонский, Кузьмина, 1986] (е)

По итогам моделирования составлены рекомендации к специальным полевым работам, которые необходимы для развития модели в случае ее

включения в систему мониторинга опасных явлений в устьевой области Северной Двины. Выявленная взаимосвязь распределения расходов воды по рукавам дельты от среднего за приливный цикл уровня воды и амплитуды прилива ведет к необходимости сопровождения натуральных измерений расходов воды в рукавах детальными наблюдениями за уровнем воды на морском крае дельты.

В заключении перечислены основные результаты проведенного исследования и сформулированы выводы.

- Предложенная методика комплексного анализа динамики потока в устье крупной реки, основанная на сочетании современных методов гидрологических исследований, позволила на примере многорукавной приливной устьевой области Северной Двины продемонстрировать ее возможности в части исследования тех аспектов гидродинамического режима устьевой области, которые в настоящее время не могут быть охвачены мониторинговыми наблюдениями.

- Созданная модель удовлетворительно рассчитывает динамику водной поверхности в пределах дельты и придельтового участка Северной Двины как в приливных, так и в бесприливных условиях в отсутствии ледяного покрова и других ледовых явлений. Средняя квадратическая ошибка расчета уровня воды составляет от 5 до 20 см. Критерий эффективности расчета Нэша-Сатклифа для уровней воды варьирует от 0,72 до 0,98. Расходы воды в рукавах дельты Северной Двины в бесприливных условиях повышенного речного стока моделируются с точностью до 5 % (от общего расхода в вершине устьевой области). Выявлена высокая чувствительность воспроизведения моделью распределения расходов воды в рукавах в меженных приливных условиях к способу задания уровня воды на нижней границе.

- При изменении амплитуды колебаний уровня на нижней границе от квадратуры к сизигии (с 0,35 м до 0,75 м) дальность проникновения прилива вглубь устьевого участка реки увеличивается на 10–20 км.

- Установлено, что резкое изменение интенсивности затухания приливных колебаний уровня воды вверх по длине устьевого участка реки в меженных условиях приурочено к лимитирующему судоходство перекаату Юра в Холмогорском разветвлении, а при больших расходах воды – к местам резкого сужения долины (94 и 62 км от морского края дельты).

- Выявлено, что распределение средних за приливный цикл расходов воды по рукавам в меженных условиях зависит не только от расхода воды в вершине устьевой области, но и в значительной степени, от параметров колебаний уровня воды на морском крае дельты. Увеличение среднего за приливный цикл уровня моря с $-0,4$ до 0 м абс. приводит к увеличению стока в Никольском и Мурманском рукавах, и соответственному уменьшению стока в остальных рукавах. При изменении амплитуды прилива от квадратуры к сизигии расходы воды в Никольском и Мурманском рукавах увеличиваются, а расходы в остальных рукавах снижаются в два раза.

- По результатам сценарных расчетов предложено районирование устьевой области Северной Двины по величине прилива, включающее 3 основные зоны: верхняя часть устьевого участка (Холмогорское разветвление) (I), нижняя часть устьевого участка (II), дельта (III). В дельте выделены подзоны с повышенной величиной прилива: 1) в нижних частях Маймаксы и Кузнечихи, 2) в устье Никольского рукава.

- В соответствии с концепцией предложенной методики исследования сформулированы рекомендации по совершенствованию системы мониторинга и перспективы развития модели.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации

1. Алабян А. М., Беликов В. В., Крыленко И. Н., Лебедева С. В. Применение двумерных гидродинамических моделей для решения проблем

регулирования русла Нижней Волги в условиях дефицита данных гидрологических изысканий // Инженерные изыскания, 2014. №2. С. 18–28.

2. **Лебедева С.В.**, Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск, 2015. №1. С. 18–25.

Статьи в других научных изданиях

3. Magritsky D.V., **Lebedeva S.V.**, Polonsky V.F., Skripnik E.N. Inundations in the delta of the Northern Dvina river // Journal of geographical institute «Jovan Cvijic», 2013 №63(3) P. 133–145.

Тезисы докладов на научных конференциях

4. **Лебедева С.В.** Моделирование русловых деформаций на перекатном участке в Холмогогорском разветвлении реки Северная Двина // Сборник трудов VI Международной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность». М., 2012. С. 121–123.

5. **Лебедева С.В.** Гидродинамическое моделирование устья реки Северная Двина и оценка степени возможных ущербов от наводнений в ее дельте // Материалы всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз». Новочеркасск, 2013. С. 174–180.

6. **Лебедева С.В.**, Алабян А. М. Методика исследования динамики потока в устьевых областях крупных рек и ее реализация для устья Северной Двины // Сборник тезисов международной научно-практической конференции «Вторые Виноградовские Чтения. Искусство гидрологии» памяти Ю.Б. Виноградова. СПб., 2015. С. 337–341.

7. **Лебедева С.В.** Моделирование течений в многорукавной приливной устьевой области Северной Двины // Труды IV Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)». Москва, 2015. С. 313-317.

